PRÁCTICAS de laboratorio sobre resistencia de materiales

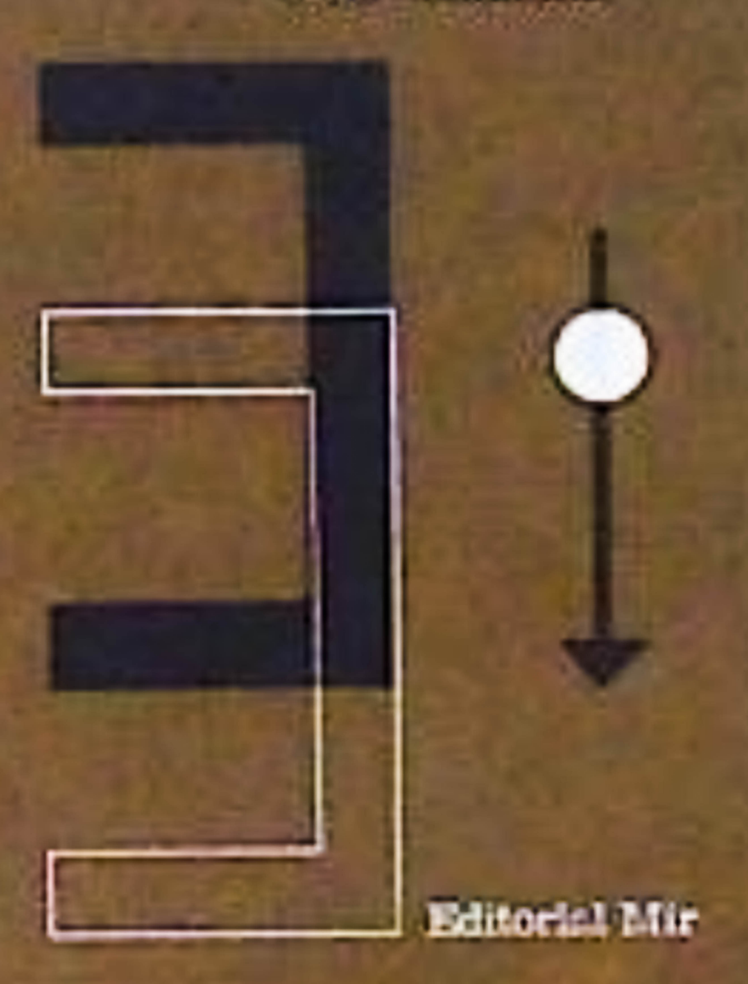
A.M. Afanásiev
V.A. Marien



Editorial Mir

PRÁCTICAS de laboratorio sobre resistencia de materiales

A. M. Afanásiev
V. A. Marien



Editorial Mir


ИЗДАТЕЛЬСТВО • МИР •

А.М.АФАНАСЬЕВ, В.А.МАРЬИН

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА

PRÁCTICAS de laboratorio sobre resistencia de materiales

A.M. Afanasiev,
V.A. Marien

Editorial Mir
Moscú

Traducido del ruso por el ingeniero B. A. Mirchevski

Impreso en la URSS. 1978

На испанском языке

INDICE

PARTE II

EQUIPO DEL LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

PREFACIO

Los ensayos mecánicos son parte integrante del curso de Resistancia de Materiales que trata sobre la resistencia y la rigidez de los elementos de estructuras. Esta materia necesita la argumentación experimental de las hipótesis originales, la comprobación de las deducciones teóricas y el estudio del proceso de la deformación hasta la destrucción. Éstas tareas deben ser cumplidas por las prácticas de laboratorio que acompañan el curso de Resistencia de Materiales.

El presente texto es una guía para la realización y preparación de las prácticas de laboratorio, y es un suplemento al manual de Resistencia de Materiales para los centros de enseñanza superior técnica, pero puede servir también de material didáctico para las escuelas técnicas medias.

El manual consta de dos partes:

I. Descripción de las prácticas de laboratorio.

II. Descripción de las máquinas de ensayo, instalaciones e instrumentos de medición.

La primera parte conserva el orden según el cual se realizan generalmente los experimentos en el laboratorio. En las descripciones de éstos se señalan: el propósito del experimento, el planteamiento de la tarea, los datos teóricos correspondientes, la forma de los registros del laboratorio, el orden en que se realiza el experimento y las aclaraciones necesarias sobre el uso de los aparatos y métodos de interpretación de los resultados del experimento. En algunos casos se describen los instrumentos y máquinas utilizados. Pero, en general, es en la segunda parte donde se dan las descripciones de las máquinas, instalaciones y dispositivos especiales y se examinan los esquemas principales de los aparatos más difundidos, su destino, esferas de utilización, reglamento de explotación, precisión y escalas de las indicaciones.

Junto al contenido tradicional se presta mucha atención a las tareas y los métodos nuevos. Se describen algunas instalaciones de mesa para ensayos especiales, los métodos eléctricos y ópticos de medición de las deformaciones y los aparatos correspondientes. Se muestra la utilización de estos métodos para cargas estáticas y dinámicas.

PARTE I

Prácticas de laboratorio

CAPÍTULO I

Determinación de las constantes de elasticidad y de las principales características mecánicas de los materiales

EXPERIMENTO 1. DIAGRAMA DE TRACCION DEL ACERO DULCE

1. Datos generales. El propósito del experimento consiste en investigar el proceso de tracción de una probeta metálica hasta su rotura y determinar a la vez las siguientes características mecánicas del material: 1) límite de fluencia σ_f; 2) límite de resistencia σ_r; 3) tensión durante la rotura s_k; 4) alargamiento durante la rotura δ; 5) reducción ψ en el cuello; 6) trabajo especifico a gastado para la rotura.

La probeta metálica estándar para el ensayo de tracción tiene el aspecto presentado en la fig. 1, *a*. La longitud de la parte cilíndrica de la probeta es igual a $11d$, siendo d el diámetro de la probeta. La longitud $l = 10d$ se llama *longitud de cálculo* de la probeta. Si el diámetro es $d = 2$ cm, la probeta se llama *normal.*

Llamando F el área de la sección de la probeta, obtendremos para una probeta normal las siguientes relaciones:

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = 1,13\sqrt{F} \quad \text{y} \quad l = 11,3\sqrt{F}.$$

Se emplean también probetas de sección transversal no redonda. El ancho de una probeta estándar de sección rectangular es tres veces mayor que su espesor, y su longitud de cálculo l también se toma igual a $11,3\sqrt{F}$.

Para los ensayos se utilizan además probetas menores (fig. 1, *b*) que tienen la relación igual a 5 entre la longitud de la parte cilíndrica y el diámetro. Dichas probetas se utilizan para los ensayos en la prensa de Gagarin y en algunas otras máquinas.

2. Prensa de Gagarin. La tracción de la probeta se efectúa en una u otra máquina de ensayo. En los laboratorios de fábricas y

centros de enseñanza la prensa de A. G. Gagarin (fig. 2) fabricada en varias series, es ampliamente conocida.

La prensa de Gagarin se utiliza para los ensayos tanto a compresión como a tracción. Para los ensayos a tracción se emplea un dispositivo denominado inversor. La probeta se coloca en el inversor como se muestra en la fig. 1, *c*; la fuerza de compresión de la prensa que actúa por arriba y por abajo sobre las superficies de apoyo del inversor, tracciona la probeta. Existen también inversores para los ensayos al cizallamiento y a la torsión.

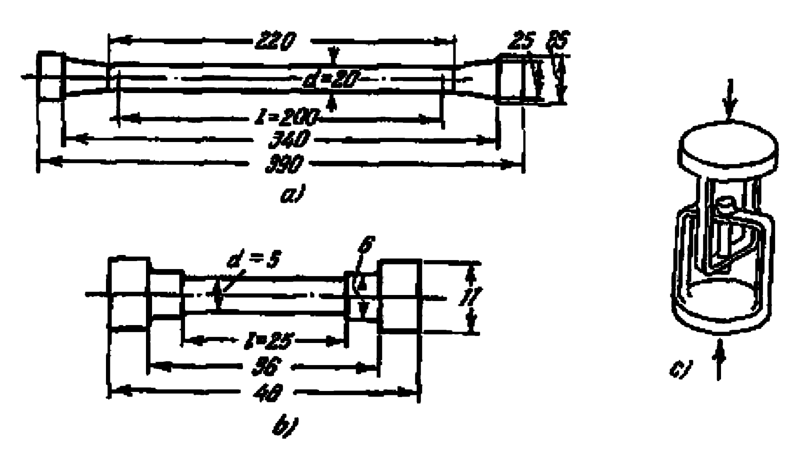


Fig. 1 | Probetas metálicas para los ensayos: *a*, probeta normal; *b*, probeta menor; *c*, esquema del inversor.

El esquema de la prensa de Gagarin aparece en la fig. 3. Mediante un motor o a mano se da movimiento giratorio alrededor de su eje al tambor de diagramas *1*. Entonces avanza el tornillo *5* que ejerce presión sobre la probeta *2* (en la fig. 3 está presentado el inversor con la probeta ensayada a tracción). La fuerza de presión del tornillo se transmite mediante la probeta sobre el brazo corto de la palanca *3*. En el otro brazo de la palanca se encuentra el peso equilibrante *4* suspendido de la carretilla que puede moverse sobre la palanca. El traslado de la carretilla se hace automáticamente por medio de los mecanismos de muelle de relojería *6* y *7*, cada uno de los cuales puede conectarse a la cadena sin fin *8* que traslada la carretilla con carga; el mecanismo *6* mueve la carretilla hacia la izquierda, y el mecanismo *7*, hacia la derecha. Si la carga aumenta, el brazo largo de la palanca *3* se levanta y uno de los salientes del regulador *9* se aprieta contra el volante del mecanismo *6*, como está mostrado en la fig. 3, y lo frena. Simultáneamente, el mecanismo *7* aparta el peso *4* hacia la derecha hasta que se baje la palanca; entonces comienza a frenar el mecanismo *7* y el mecanismo *6* empieza a

apartar el peso en sentido contrario [1]). De modo que cada bajada o levantamiento de la palanca es detenido inmediatamente por el desplazamiento correspondiente del peso equilibrante *4*. Es decir, la carga sobre la probeta siempre es proporcional al brazo del peso equilibrante. En la palanca *6* hay escala de cargas.

La prensa de Gagarin pertenece a una clase amplia de máquinas de ensayo que tienen el excitador de fuerza de tornillo y el medidor de fuerza de palanca. La prensa de Gagarin tiene la preferencia ante otras máquinas de la misma clase de que está dotada de un dispositivo para el equilibrio automático de la carga. La gran ventaja de la prensa de Gagarin es una escala grande del diagrama que representa la dependencia entre la carga y el alargamiento de la probeta.

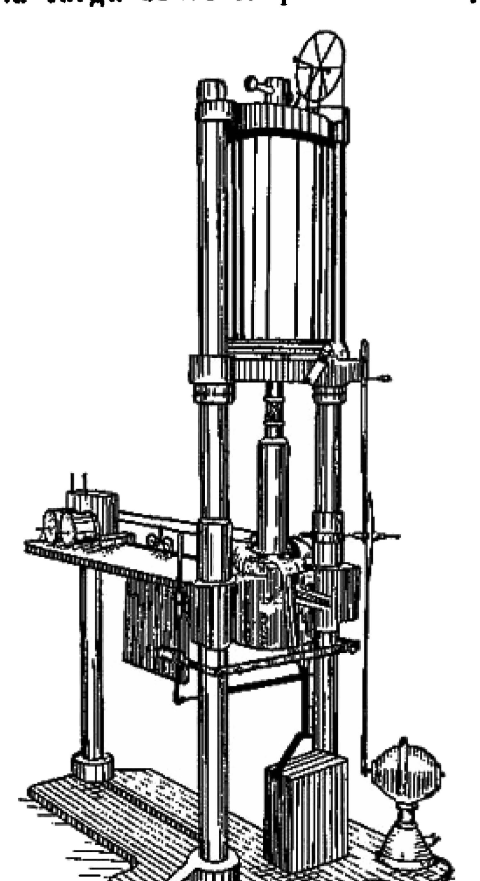


Fig. 2 | Aspecto general de la prensa de Gagarin.

El diagrama se obtiene del modo siguiente: la pluma *10* (fig. 3) que traza en el tambor *1* el diagrama se desplaza por la vertical entre las guías. La posición de la pluma está determinada

[1]) A veces, en vez del dispositivo descrito, se utiliza un regulador electromagnético.

por la posición de la carretilla con el peso equilibrante *4* en la palanca *3*, porque está suspendida del hilo unido con la carretilla y, por lo tanto, al traslado de la carretilla a lo largo de la palanca le corresponde igual traslado vertical de la pluma. De esta manera, la escala vertical del diagrama, o la escala de cargas, coincide con la escala de la palanca, siendo ésta 100 kgf en 1 cm, ó 20 kgf en 1 cm, según el valor del peso *4*. La carga máxima es de 5 tf.

La escala vertical del diagrama, es decir, la escala de los alargamientos, depende de la velocidad de giro del tambor. El

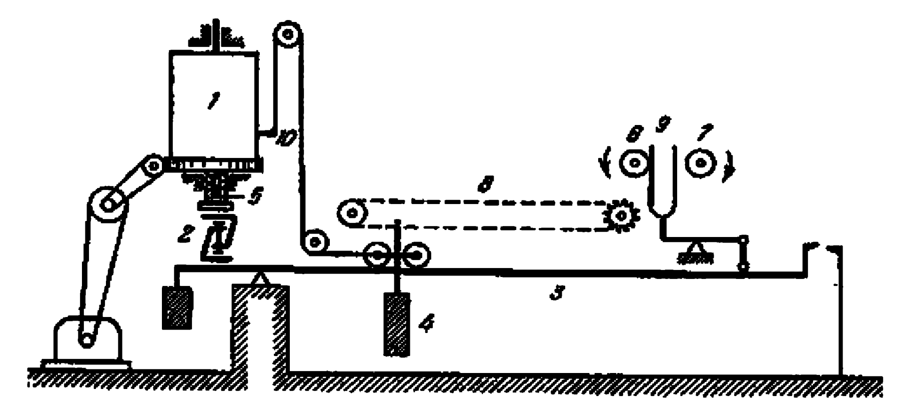


Fig. 3 | Esquema de la prensa de Gagarin: *1*, tambor de diagramas; *2*, inversor con probeta; *3*, palanca; *4*, peso equilibrante; *5*, tornillo; *6*, *7*, mecanismos de relojería; *8*, cadena sin fin; *9*, regulador automático de los mecanismos de relojería; *10*, pluma.

ángulo de giro del tambor de diagramas es proporcional a la magnitud del descenso del tornillo, es decir, al alargamiento de la probeta (si se desprecia la deformación del inversor); por lo tanto, al girar el tambor, la pluma traza en su superficie una línea, cuya proyección horizontal es proporcional al alargamiento de la probeta. A un milímetro del alargamiento de la probeta le corresponden 10 cm sobre el eje de las abcisas en el diagrama, es decir, los alargamientos son aumentados 100 veces.

La probeta se coloca en el inversor que se sitúa luego bajo el tornillo de la máquina. El tornillo se pone a mano en contacto con el inversor. Antes de poner en marcha el motor, es necesario revisar la disposición del aparato de diagramas y del medidor de fuerza: en el tambor de diagramas debe haber una línea horizontal que corresponde a la falta de carga y representa el eje de las abcisas, y el excéntrico de freno de la carretilla tiene que estar soltado. Es conveniente también revisar si no se ha saltado de los

rodillos el hilo que sostiene la pluma. Hay que acercar a la carretilla el cursor de indicación en la escala de la palanca.

3. Diagrama de tracción. La máquina de ensayo le comunica a la probeta un alargamiento forzado y registra su resistencia, es decir, la carga correspondiente a este alargamiento. El resultado del experimento se representa por el diagrama de tracción. En la fig. 4, *a* aparece el diagrama de tracción del acero pobre en carbono obtenido en la máquina de ensayo del tipo señalado. En el eje de las abcisas se situaron los alargamientos λ de la probeta, y en el eje de las ordenadas, las cargas P.

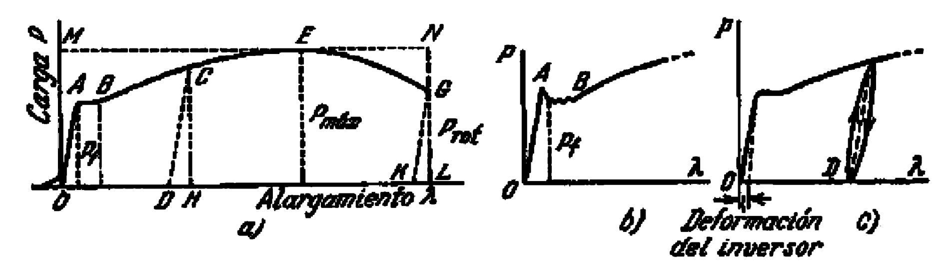


Fig. 4 | Diagrama de los alargamientos en función de la carga obtenido en la máquina de ensayo: *a*, diagrama de tracción del acero pobre en carbono; *b*, «diente de fluencia»; *OA*, tramo rectilíneo que expresa la ley de Hooke; *AB*, escalón de fluencia; *BE*, zona de endurecimiento de la probeta; *EG*, zona de disminución de la resistencia de la probeta a causa de la formación del cuello; *CD*, descarga.

El tramo rectilíneo del diagrama indica la proporcionalidad entre los alargamientos y la carga (la ley de Hooke). La alteración de esta proporcionalidad al seguir aumentando la carga va acompañada, para los aceros dulces, de la así llamada fluencia: crecimiento rápido de los alargamientos sin aumento de la carga (a veces, hasta su descenso, fig. 4, *b*). El período de fluencia se expresa en el diagrama con el tramo *AB*, próximo al horizontal, llamado con frecuencia escalón de fluencia. La tensión que corresponde a la fluencia se denomina *límite de fluencia* σ_f.

La fluencia se explica mecánicamente como desplazamientos mutuos de las partículas del material. En la superficie de la probeta pulida se puede observar con ayuda de una lupa rayas inclinadas que son líneas de desplazamientos. Estas líneas se llaman líneas de Chernov — Lüders. La mayoría de ellas forman con la generatriz un ángulo de alrededor de 50°, lo que corresponde aproximadamente a la posición de los planos de tensiones tangenciales máximas.

Los aceros altos en carbono y otros de mucha resistencia (al igual que los demás materiales, menos el acero dulce) no dan el

escalón de fluencia. El límite de fluencia para estos aceros se toma convencionalmente igual a la tensión, con la cual el alargamiento permanente de la probeta llega a ser un 0,2% o un 0,5% de su longitud. Se denota por $\sigma_{0,2}$ y $\sigma_{0,5}$.

Después de la etapa de fluencia el material vuelve a oponer resistencia a la carga creciente. Comienza la llamada etapa de endurecimiento.

La tensión convencional que se obtiene como el cociente de la división de la carga máxima observada durante el experimento ($P_{máx}$) por el área inicial de la sección transversal de la probeta (F) se llama *resistencia provisional* o *límite de resistencia del material* y se denomina σ_r.

Si la carga es máxima, en la probeta comienza a formarse una reducción local de la sección transversal, el cuello, a causa de la cual la resistencia de la probeta disminuye rápidamente y la curva en este punto desciende. Sin embargo, *la tensión verdadera* que se obtiene mediante la división de la carga por el área respectiva de la sección de la probeta en el cuello, aumenta. En el instante de la rotura, la tensión verdadera en el cuello tiene el valor máximo y puede superar dos y hasta tres veces la resistencia provisional.

4. Realización del ensayo e interpretación de los datos. Antes de colocar la probeta en la máquina, aquélla se mide cuidadosamente con un pie de rey (véase el § 1 de la parte H). Es necesario medir el diámetro y la longitud de la probeta.

Se puede empezar a cargar la probeta solamente después de haber revisado la disposición de la máquina y de los instrumentos para el ensayo. Es preciso hacer la primera parte del ensayo, correspondiente al tramo rectilíneo del diagrama, lentamente para evitar los efectos de inercia que alteran el diagrama.

La velocidad de carga en la prensa de Gagarin está determinada por el régimen establecido del funcionamiento del motor. Por eso hay que observar con especial atención la fase inicial del ensayo, que transcurre con rapidez.

Un pequeño tramo inicial del diagrama obtenido en la prensa de Gagarin suele ser curvilíneo (véase a la izquierda en la fig. 4, *a*) y se convierte después en una recta. Esta parte curvilínea del diagrama se origina por falta de contacto total entre las cabezas de la probeta y el inversor. Hay que excluir este sector curvo inicial prolongando la línea recta del diagrama hacia abajo, como puede verse en la fig. 4, hasta su intersección con el eje de las abscisas. El punto de intersección obtenido se considerará el origen del diagrama.

La deformación de la probeta en la fase inicial de la tracción que corresponde al tramo rectilíneo del diagrama, es *elástica*. Al iniciarse el período de fluidez, la probeta comienza a obtener una

deformación remanente considerable, la así llamada *deformación plástica* o *permanente*. Para convencerse de esto, interrumpamos la carga de la probeta en un momento arbitrario del ensayo. Supongamos que el punto C (fig. 4, *a*) corresponde al momento en que se interrumpe la carga de la probeta. El alargamiento total de la probeta en este momento se expresa por el segmento OH en el eje de las abscisas. Luego, descargando paulatinamente la probeta, notaremos la reducción de su longitud. La descarga se representará por la recta CD paralela al tramo inicial del diagrama. El segmento DH es el alargamiento elástico de la probeta y el segmento OD es el permanente.

Como vemos, el alargamiento elástico obedece a la ley de Hooke en cualquier etapa de deformación de la probeta.

Ahora carguemos de nuevo la probeta. En el diagrama se repetirá la misma recta DC, pero invertida, y al seguir cargando obtendremos la curva CEG como si fuera la prolongación del diagrama anterior.

Hay que señalar que el fenómeno susodicho está descrito aquí esquemáticamente. En realidad, las líneas de carga y de descarga no son rectas ideales y, al no coincidir una con la otra, forman el llamado lazo de histéresis (fig. 4, *c*).

El alargamiento permanente total Δl de la probeta se determinará en el diagrama por el segmento OK (fig. 4, *a*) en el eje de las abscisas, cortado por la recta GK trazada por el punto G de la curva paralelamente al tramo inicial rectilíneo OA del diagrama.

La relación del alargamiento absoluto Δl de la probeta respecto a su longitud primitiva l (en tantos por ciento) se llama *alargamiento relativo* δ, es decir,

$$\delta = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%.$$

La relación $\frac{F - F_1}{F}$ se llama *reducción* (estricción) *relativa* ψ de la sección transversal de la probeta, donde F es el área primitiva de la sección de la probeta y F_1 es el área de la sección en el lugar de rotura, el cuello. En general, la magnitud ψ se expresa en tantos por ciento:

$$\psi = \frac{F - F_1}{F} \cdot 100\%.$$

La deformación elástica obtenida en el diagrama de la prensa de Gagarin resulta exagerada porque incluye la deformación del inversor y de otras partes de la máquina. La deformación del inversor por su magnitud es del mismo orden que el alargamiento elástico de la probeta. Por lo tanto, el diagrama obtenido en la prensa de Gagarin no da una idea sobre la deformación elástica

real de la probeta. En diferente grado otras máquinas de ensayo tienen también la misma insuficiencia. La deformación del inversor λ_1 puede ser medida previamente y tomada en consideración (fig. 4, *c*). La recta punteada dibuja la deformación real de la probeta (hay que considerar el origen de la lectura de λ trasladado al punto inferior de la recta punteada).

El área del diagrama comprendida entre la curva *OAG* (fig. 4, *a*) y el eje de las abscisas, representa el trabajo gastado para la tracción de la probeta. Para calcularlo, se puede usar un planímetro. Supongamos, por ejemplo, que el área del diagrama medida con planímetro sea igual a S cm². Las escalas del diagrama son las siguientes: a 1 cm por la vertical (es decir, por el eje de las cargas), le corresponden m kgf; a 1 cm por la horizontal (es decir, por el eje de los alargamientos), n cm. Por lo tanto, 1 cm² del diagrama equivale a mn kgfcm de trabajo y el trabajo total es $T = Smn$.

El área S se determina aproximadamente utilizando el llamado *coeficiente de amplitud del diagrama*, igual a $\nu = S/S'$, donde S' es el área del rectángulo circunscrito *OMNL* (fig. 4, *a*). El área S' expresa el trabajo que es igual al producto $P_{máx}\Delta l$, siendo Δl el alargamiento de la probeta (el segmento *OL* en la fig. 4, *a*). Llamemos este trabajo T'. El trabajo gastado real T, expresado con el área S, es un poco menor e igual a $T'\nu$, es decir,

$$T = P_{máx}\Delta l\nu. \qquad (1)$$

Para el acero corriente pobre en carbono se puede tomar el coeficiente de amplitud del diagrama ν igual a 0,85.

El trabajo total gastado para la rotura de la probeta, referido a una unidad de su volumen, se llama *trabajo específico* de la rotura,

$$a = \frac{T}{V}. \qquad (2)$$

Aquí V es el volumen de la parte intermedia cilíndrica de la probeta.

Las partes engrosadas de la probeta cerca de sus cabezas no suelen sufrir deformaciones plásticas y su deformación elástica y, por consiguiente, el trabajo que le corresponde son insignificantemente pequeños en comparación con el trabajo total T. El cálculo del trabajo se realiza para la parte cilíndrica de la probeta con una longitud l (fig. 1, *a*) que se llama longitud de cálculo. Una parte del trabajo que pertenece a la longitud de cálculo de la probeta la denominaremos T_c. Entonces el trabajo específico se determinará del modo siguiente:

$$a = \frac{T_c}{V_c}. \qquad (3)$$

El valor de T_c se puede establecer aproximadamente por medio de la fórmula (1), colocando en vez de Δl no el alargamiento total de la probeta, sino solamente el alargamiento de su parte de cálculo determinada con ayuda de la medición directa.

Los resultados del experimento descrito se anotan en el registro del laboratorio de acuerdo con la forma indicada en las tablas 1 y 2. Además, se hacen las siguientes anotaciones:

Tabla 1

Dimensiones de la probeta

Antes del ensayo			Después de la rotura		
l	d	$F=\frac{\pi d^2}{4}$	l_1	d_1	$F_1=\frac{\pi d_1^2}{4}$

Tabla 2

Resistencia de la probeta en kgf

Durante la fluencia P_f	Máxima $P_{máx}$	En el momento de rotura P_{rot}

Alargamiento total permanente de la parte de cálculo de la probeta es

$$\Delta l = \ldots \text{ cm.}$$

Trabajo gastado para la tracción de la parte de cálculo de la probeta

$$T_c = P_{máx} \Delta l_c \nu = \ldots \text{kgfcm.}$$

Características obtenidas.

Límite de fluencia $\sigma_f = \frac{P_f}{F} = \ldots$ kgf/cm²

Límite de resistencia $\sigma_r = \frac{P_{máx}}{F} = \ldots$ kgf/cm²

Tensión de rotura (verdadera) $s_k = \frac{P_{rot}}{F_1} = \ldots$ kgf/cm²

Reducción relativa de rotura $\psi = \frac{F - F_1}{F} \cdot 100\% = \ldots \%$

Alargamiento relativo $\delta = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% = \ldots \%$

Trabajo específico $a = \frac{T_r}{lF} = \ldots$ kgfcm/cm³

Construcción del gráfico de los alargamientos. Antes de haber sido ensayada, la probeta se marca mediante una máquina de división (§ 5 de la parte II) en partes iguales de 1 cm cada una Una vez realizado el ensayo, se miden los alargamientos de las partes que resultan ser desiguales. Los alargamientos máximos tienen los tramos ubicados cerca del cuello. Las magnitudes de

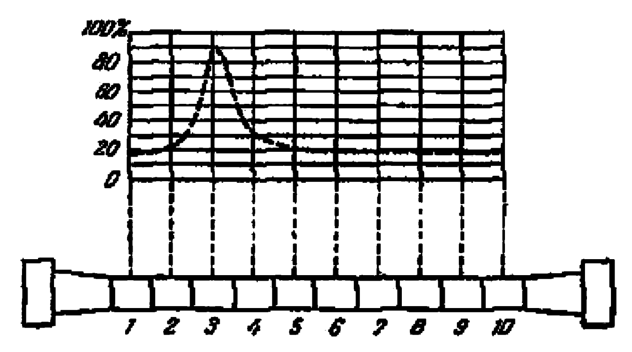


Fig. 5 | Gráfico de distribución de las deformaciones residuales por la longitud de la probeta (la cresta corresponde al lugar del cuello y la rotura).

los alargamientos de cada parte se determinan directamente, midiéndolas con una regla. Estas magnitudes, expresadas en centímetros, representan numéricamente alargamientos relativos de las partes. La anotación de los alargamientos se realiza de acuerdo con la forma dada en la tabla 3 para una probeta con longitud $l = 10d = 10$ cm.

Tabla 3

№ de las partes por orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alargamiento de la parte luego de romperse la probeta, en cm										

Colocando los alargamientos medidos de las partes en una escala, se obtendrá el gráfico de distribución de los alargamientos a lo largo de la probeta (fig. 5).

La suma de los alargamientos de las partes es el alargamiento total absoluto de la parte de cálculo de la probeta. El alargamiento relativo δ es igual al alargamiento absoluto dividido por la longitud de la parte de cálculo de la probeta. δ se escribe con el índice 10 ó 5 que indica la relación entre la parte de cálculo de la probeta y su diámetro.

5. Reducción del lugar de la rotura hacia el centro de la probeta. A veces la rotura de la probeta sucede cerca de su extremo. En este caso el alargamiento de la probeta es menor de lo corriente. Para obtener un resultado real sin tener que repetir el experimento, la medición de la probeta después del ensayo se realiza del modo siguiente: desde el trazo extremo (señalado en la fig. 6 con un cero) se mide un número par de n partes de tal manera que el lugar de la rotura se encuentre aproximadamente en medio

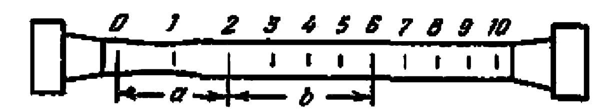


Fig. 6 | Probeta de acero dulce después del ensayo de rotura.

del tramo medido. Si el lugar de la rotura se encuentra más cerca del otro extremo de la probeta, la medición se realiza desde el último trazo. En el ejemplo examinado $n = 2$. Llamemos a la longitud respectiva. Supongamos que la probeta tiene en total m partes (generalmente m es igual a 20 ó 10). Se toman por la longitud de cálculo después del ensayo $l_1 = a + 2b$, siendo b la longitud del tramo adyacente al tramo a que contiene $\frac{m-n}{2}$ partes. En el caso de $m = 10$ mostrado en la fig. 6, tenemos:

$$\frac{m-n}{2} = \frac{10-2}{2} = 4.$$

El alargamiento relativo de la probeta en tantos por ciento será

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100\%.$$

EXPERIMENTO 2. DETERMINACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD E Y DE LOS LIMITES DE PROPORCIONALIDAD Y DE FLUENCIA

1. Datos generales. En la etapa inicial de deformación de la probeta, para la mayoría de los metales es válida la ley de Hooke,

$$\lambda = \frac{Pl}{EF}$$

que expresa la proporcionalidad entre el alargamiento de la probeta y la carga P.

De aquí

$$E = \frac{Pl}{F\lambda}. \tag{4}$$

De tal manera, el módulo E puede ser determinado, si medimos el alargamiento λ de la probeta y la carga respectiva P.

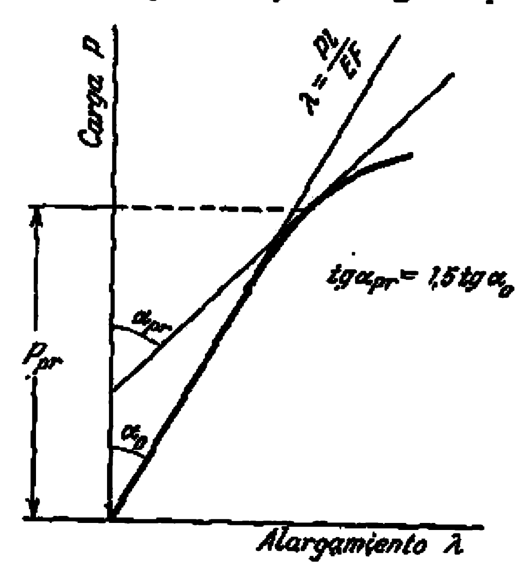


Fig. 7. Respecto a la obtención del límite de proporcionalidad. La magnitud de la fuerza de tracción P_{pr} corresponde al límite de proporcionalidad.

La tensión máxima, cuando es válida todavía la ley de Hooke, se llama límite de proporcionalidad σ_{pr}. Para hallar σ_{pr}, se sigue cargando la probeta hasta que los incrementos del alargamiento $\Delta\lambda$ correspondientes a incrementos iguales de la carga ΔP, no aumenten notoriamente. Para el acero se considera que se ha llegado al límite de proporcionalidad cuando el valor observado de $\Delta\lambda$ sobrepasa el valor promedio obtenido en la etapa inicial lineal de carga, en un 50%. Esto equivale al aumento en el 50% de "la tangente" del ángulo [1]) entre la tangente a la línea de $P(\lambda)$ y el eje de P (fig. 7).

Tras de hallar el límite de proporcionalidad, se determina también el límite de fluencia. Si falta el escalón de fluencia, el límite de fluencia se considera convencionalmente como la tensión que corresponde al alargamiento permanente igual al 0,2% de la longitud de la probeta.

[1]) Se tiene en cuenta la tangente «denominada» en cm/kgf).

Los ensayos se realizan en una probeta normal (véase la fig. 1, *a*) o en una proporcional, es decir, que tenga la relación de la longitud de cálculo respecto al diámetro igual a 10.

2. Máquina ГЗИП P-5 (GZIP R-5) con fuerza de hasta 5 tf. El ensayo de la probeta normal (la probeta normal tiene el diámetro de 2 cm) de acero pobre en carbono es posible en la máquina con una potencia no menor de 30 tf (estas máquinas están descritas en los §§ 10 y 11 de la parte II). Pero no pocas veces se utilizan las probetas proporcionales con dimensiones menores. En estos casos se pueden utilizar máquinas de poca potencia.

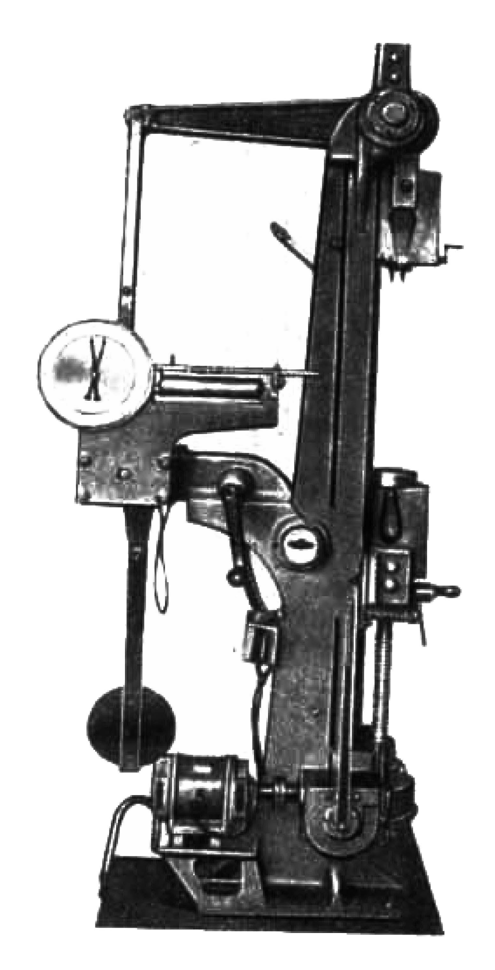


Fig. 8 | Aspecto general de la máquina ГЗИП P-5 (GZIP R-5) para los ensayos a tracción y compresión.

La máquina ГЗИП P-5 (GZIP R-5) con la fuerza de 5 tf, mostrada en la fig. 8 y 9, tiene, al igual que la máquina descrita en el experimento 1 la prensa de Gagarin, un tornillo en calidad de excitador de la fuerza. Sin embargo, la medición de fuerza es aquí un poco diferente, de péndulo. La tuerca *1*, movida por el motor eléctrico o a mano, desplaza el tornillo *2* en sentido vertical provocando la tracción o compresión de la probeta. Durante el

ensayo a tracción, la probeta *5* se coloca con sus extremos en los agarradores *3* y *4* de la máquina.

Si es necesario realizar un ensayo a compresión, a los agarradores se sujetan planchas de apoyo entre las cuales se coloca la probeta. El esfuerzo excitado mediante la rotación de la tuerca y transmitido sobre la probeta se equilibra mediante un sistema de

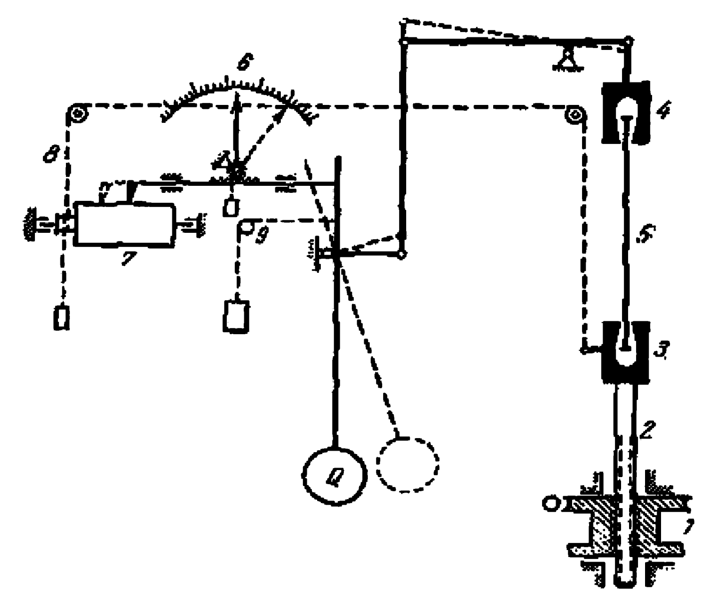


Fig. 9 | Esquema de la máquina ГЗИП Р-5 (GZIP R-5): *1*, tuerca; *2*, tornillo; *3* y *4*, agarradores; *5*, probeta; *6*, escala del medidor de fuerza; *7*, tambor de diagramas; *8*, hilo que hace girar el tambor; *9*, freno del péndulo.

palancas por el contrapeso *Q* montado en el péndulo [1]). La magnitud del esfuerzo se coloca en escala 50 kgf en 1 mm (25, 10 ó 5 kgf en 1 mm, según el valor del contrapeso *Q*) en el tambor de diagramas *7* y puede leerse también en la escala *6*. Las deformaciones de la probeta se fijan en el tambor en escala 2 : 1 ó 1 : 1 durante el giro del tambor bajo la acción del hilo tendido *8*.

Una vez destruida la probeta, el contrapeso *Q* vuelve a su posición inicial. Lo resiste el freno en forma de soga pasada por el cuello *9* y dotada de un peso en el extremo. El freno aguanta el péndulo durante su caída, impidiendo que éste pase mucho más

---

[1]) La denominación «péndulo» aquí es convencional y se basa solamente en la semejanza exterior del contrapeso en cuestión con el péndulo suspendido. El contrapeso no hace el movimiento oscilatorio de un péndulo, sino que siempre equilibra estáticamente el esfuerzo aplicado a la probeta

allá de su posición vertical inicial. Si falta el freno, el péndulo oscila libremente, mas la aguja principal del medidor de fuerza puede abatir la aguja de control que indica el valor máximo de la carga durante el experimento. El freno se sujeta al péndulo antes de empezar el ensayo y no influye sobre las indicaciones de la máquina durante el experimento, porque ejerce sobre el péndulo

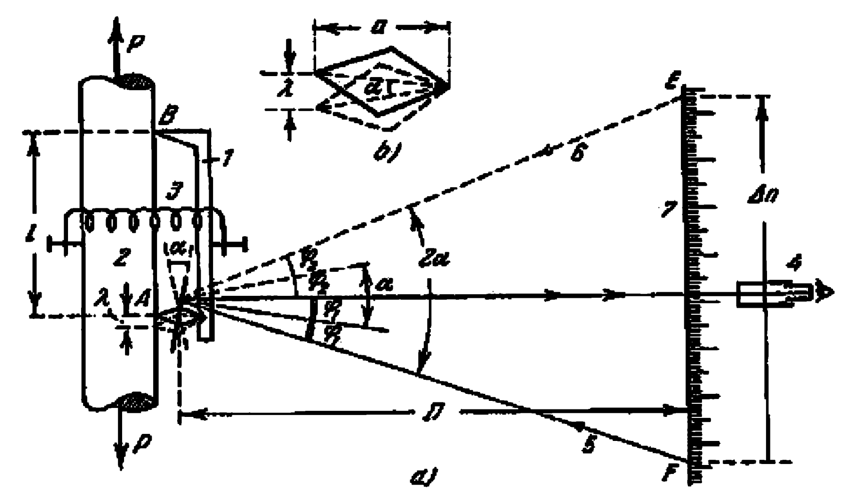


Fig. 10 | Extensómetro de espejo: *a*, esquema del mecanismo; *b*, esquema del giro del prisma; *1*, plancha; *2*, probeta; *3*, muelle que aprieta la plancha contra la probeta; *A*, prisma portaespejo; *4*, tubo óptico; *5* y *6*, rayos de luz que van de la regla *7* al tubo con distintas posiciones del espejo.

una influencia constante. Ambas agujas del medidor de fuerza se ponen en cero luego de suspender el peso del freno.

3. Extensómetro de espejo. El alargamiento de la probeta se mide con un instrumento que se llama extensómetro. Existen varios tipos de extensómetros. Más adelante se describe la estructura del extensómetro de espejo (instrumento de Martens).

La plancha *1* (fig. 10, *a*) instalada en la probeta *2*, está fijada por medio de la mordaza de muelle *3*. La punta *B* sirve de apoyo para la plancha, mientras que el otro extremo está apoyado sobre el prisma *A* de una sección rómbica. La longitud *AB* que denominaremos *l*, se llama base del instrumento. Al prisma *A* está unido un pequeño espejo (en la fig. 10, *a* el plano del espejito es perpendicular al plano del dibujo). A una distancia *D* del pequeño espejo, en un soporte especial está colocada la regla *7* con la división milimetrada. Mediante el tubo óptico *4* se observa la lectura de la regla reflejada por el espejo. Supongamos que al principio del ensayo el retículo del tubo marque una lectura n_1 determinada

con el punto *F* en la regla; un rayo de luz *5* cae desde este punto sobre el espejo bajo un ángulo φ_1 y, reflejándose bajo el mismo ángulo, alcanza el tubo.

Una vez cargada la probeta con las fuerzas de tracción, la longitud *l* recibe un incremento λ. Llamemos α el ángulo de giro respectivo del prisma *A* (fig. 10, *b*). El mismo ángulo girará el espejito. En la fig. 10, *a* se señala con líneas punteadas la nueva posición del espejito. Los ángulos de caída y de reflexión del rayo de luz *6* se indican por φ_2. La lectura n_2 en la escala está determinada ahora por el punto *E*. La diferencia de las lecturas $n_2 - n_1 = \Delta n$, dividida por la distancia *D* da el valor del ángulo $2\alpha = 2\varphi_1 + 2\varphi_2$ entre los rayos *5* y *6*, si éste es suficientemente

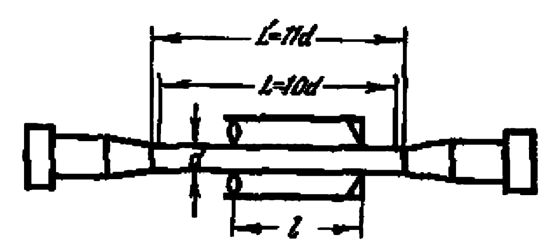


Fig. 11 | Instalación del instrumento sobre la probeta.

pequeño. De tal manera, $2\alpha = \Delta n/D$, es decir $\alpha = \Delta n/2D$. Si α es pequeño (fig. 10, *b*), se puede considerar que $\lambda = \alpha a$, donde *a* es la diagonal de la sección transversal del prisma, es decir, $\lambda = \Delta na/2D$. Denominando $2D/a = K$, obtenemos $\lambda = \Delta n/K$.

El valor de *K*, aumento del extensómetro, depende de la longitud de la diagonal *d* de la sección del prisma y de la distancia *D* entre el espejito y la regla. Por lo común *a* es igual a 0,5 ó 0,45 cm. La distancia *D* se elige de tal manera que el aumento *K* sea igual a 500, es decir, la regla se instala a una distancia del espejo $D = Ka/2 = 500a/2 = 250 \cdot 0{,}5 = 115$ cm ó $D = 250 \cdot 0{,}45 = 112{,}5$ cm. A veces esta distancia *D* se duplica, siendo en este caso $K = 1000$.

En vista de la posible excentricidad en la aplicación de las fuerzas de tracción, sobre la probeta se instalan dos extensómetros para medir los alargamientos de dos fibras contrarias de la probeta ensayada, como se muestra en la fig. 11. El alargamiento medio obtenido a partir de las indicaciones de ambos extensómetros se considera igual al alargamiento λ del eje de la probeta. La base del extensómetro de espejo varía de 5 a 20 cm. En general, es igual a 10 cm. Las descripciones de algunos otros tipos de extensómetros pueden verse en los experimentos 5 y 28, al igual que en el § 6 de la parte II.

4. Realización del ensayo e interpretación de sus resultados. La probeta colocada en la máquina se somete a una carga inicial. Con esta carga la tensión en la probeta de acero tiene que ser un poco menos de 1000 kgf/cm². Después se instalan los extensómetros y se aumenta un poco la carga para que la tensión en la probeta sea aproximadamente de 1000 kgf/cm² (en el caso de los

Tabla 4

Carga P, kgf	Lecturas de los extensómetros		Incrementos de las lecturas		Suma de los incrementos, $\Delta n = \Delta n_{izq} + \Delta n_{der}$		Suma de lecturas $n_{izq}+n_{der}$
	Izquierdo n_{izq}	Derecho n_{der}	Δn_{izq}	Δn_{der}			
700	21	25					46
			19	20	39	El valor medio de Δn para el escalón pequeño de carga $\Delta P = 150$ kgf es igual a $\Delta n_m = 9{,}5$	
1300	40	45					85
			19	18	37		
1900	59	63					122
			19	19	38		
2500	78	82					160
			5	5	10		
2650	83	87					170
			5	5	10		
2800	88	92					180
			4	5	9		
2950	92	97					189
			6	6	12		
3100	98	103					202
			6	6	12		
3250	104	109					213
			8	7	15		
3400	112	116					228
			9	9	18		
3550	121	125					246

metales no ferrosos la tensión inicial tiene que ser alrededor de 300 kgf/cm²) y en los extensómetros se toman las lecturas iniciales n_{izq} y n_{der} que se anotan en la segunda y tercera columnas del registro (véase el ejemplo en la tabla 4).

Luego se aumenta la carga a grandes escalones hasta una tensión en la probeta igual a un 65—80% del valor esperado del límite de proporcionalidad. En esta etapa de carga hay que tomar de 4 a 5 lecturas de los extensómetros.

Cerca del límite de proporcionalidad se aumenta la carga a escalones pequeños iguales, de modo que el incremento de la tensión en la probeta sea cada vez de 200 kgf/cm².

En las columnas 4 y 5 de la tabla 4 se anotan los incrementos de las lecturas Δn_{izq} y Δn_{der}, en la columna 6, las sumas de los

incrementos Δn de ambos extensómetros. Estas columnas se llenan a la par con las columnas 2 y 3, inmediatamente después de tomar la lectura.

Se continúa cargando hasta la desviación visible de la ley de proporcionalidad.

La interpretación de los resultados del ensayo se realiza en la siguiente sucesión. Se determina la suma media de los incrementos de la lectura Δn_m para el escalón pequeño de carga dentro de los límites de la proporcionalidad. Fuera de la proporcionalidad se halla el valor de Δn igual a 1,5 Δn_m. El límite convencional de proporcionalidad buscado es la tensión respectiva en la probeta.

El ejemplo de la obtención del límite de proporcionalidad dado en la tabla 4 corresponde a una probeta con diámetro de 1 cm. El área de la sección es $F = 0{,}785$ cm². El extensómetro tiene el aumento $K = 500$. La base del extensómetro es de 10 cm. El límite esperado de proporcionalidad del material es alrededor de 4000 kgf/cm².

La carga inicial es $1000 \cdot 0{,}785 = 785$ kgf. Tomamos el valor redondeado de 700 ó de 800 kgf. El 80% de la carga correspondiente al valor esperado del límite de proporcionalidad es $0{,}80 \cdot 400 \cdot 0{,}785 = 2500$ kgf. En la tabla 4 este valor de la carga se logra con tres escalones de 600 kgf cada uno. Luego el escalón de carga tiene que ser $200 \times 0{,}785 = 157$ kgf. Se ha tomado el valor redondeado de 150 kgf.

La proporcionalidad entre la carga y la deformación de la probeta se observa hasta una carga igual a 2950 kgf. Aquí los incrementos de las lecturas son uniformes tanto en los escalones grandes de carga como en los pequeños. Los incrementos totales son: en el extensómetro izquierdo $92 - 21 = 71$ y en el derecho $97 - 25 = 72$. Su suma es $71 + 72 = 143$. La suma media de los incrementos de la lectura para un escalón pequeño de carga es:

$$\Delta n_m = \frac{143}{2950 - 700} \cdot 150 = 9{,}5.$$

Aumentando esta magnitud en el 50%, obtenemos 14,3. Revisando la última columna de la tabla 4, vemos que el valor obtenido de Δn corresponde al intervalo de carga entre 3250 y 3400 kgf. Al interpolar linealmente obtenemos el valor de la carga que corresponde al límite de proporcionalidad:

$$P_{pr} = 3250 + \frac{150 \cdot 2{,}3}{3} = 3360 \text{ kgf}.$$

De ahí el límite de proporcionalidad:

$$\sigma_{pr} = \frac{P_{pr}}{F} = \frac{3360}{0{,}785} = 4300 \text{ kgf/cm}^2.$$

Ahora determinemos el módulo de elasticidad. Anteriromente hallamos $\Delta n_m = 9,5$. Esta magnitud es igual al incremento respectivo del alargamiento $\Delta\lambda$ de la probeta multiplicado por $2K$ (donde K es el aumento del extensómetro), porque Δn_m es la suma de los incrementos de las lecturas en ambos extensómetros. Por lo tanto,

$$\Delta\lambda_m = \frac{\Delta n_m}{2K} = \frac{9,5}{2\cdot 500} = 0,0095 \text{ mm} = 0,00095 \text{ cm}.$$

Este incremento del alargamiento absoluto corresponde al pequeño escalón de carga $\Delta P = 150$ kgf. Obtenemos:

$$E = \frac{\Delta Pl}{\Delta\lambda_m F} = \frac{150\cdot 10}{0,00095\cdot 0,785} = 2,02\cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2.$$

Mostremos también el método gráfico de interpretación de los resultados de las observaciones que se caracteriza por su gran claridad y está ampliamente difundido hoy en día. Coloquemos en el eje de las ordenadas (fig. 12) los valores de la carga P (la primera columna de la tabla 4) y en el eje de las abscisas, los valores de la suma $n_{izq} + n_{der}$ de las lecturas tomadas en los extensómetros (la última columna). El tramo rectilíneo del diagrama [1]) lo prolongamos hasta el eje de las abscisas y trazamos desde el punto de intersección la recta AB bajo un ángulo α_{pr} de tal manera que se cumpla (véase la pág. 20):

$$\operatorname{tg}\alpha_{pr} = \frac{2}{3}\operatorname{tg}\alpha_0.$$

Paralelamente a la recta AB trazamos la tangente CD a la línea del diagrama. El punto de contacto E determina el valor del límite de proporcionalidad.

5. Determinación del límite convencional de fluencia. La tensión inicial σ_0 del acero tiene que ser 500 kgf/cm² (para otros materiales y aleaciones la tensión inicial se toma no mayor que un 10% del valor esperado del límite de fluencia). Con la carga correspondiente a la tensión inicial se instalan los extensómetros. Luego se aplica a la probeta una carga dos veces mayor que se mantiene durante 5s, descargando después la probeta hasta la carga inicial y tomando las primeras lecturas de los extensómetros.

Posteriormente, se carga la probeta, correspondiendo el valor de la carga a un 70—80% del valor esperado del límite de fluencia y, una vez descargada la probeta hasta la carga inicial, se vuelven

---

[1]) Si los puntos resultan dispersos, se debe trazar la recta entre ellos para que la dispersión sea mínima. Esta recta puede no pasar por el origen de coordenadas, producto de los errores del experimento al principio del ensayo (véase el experimento 1, pág. 15).

a tomar las lecturas de los extensómetros. Estos indicarán alguna deformación permanente. Después la carga se aumenta un poco, el escalón del incremento de la tensión se toma igual a ~200 kgf/cm², y crece, de acuerdo a ello, la deformación permanente. Esta se mide cada vez por la diferencia entre la lectura dada y la inicial. La deformación residual que corresponde al límite convencional de fluencia se toma igual al 0,2% de la longitud de la probeta (véase la pág. 27).

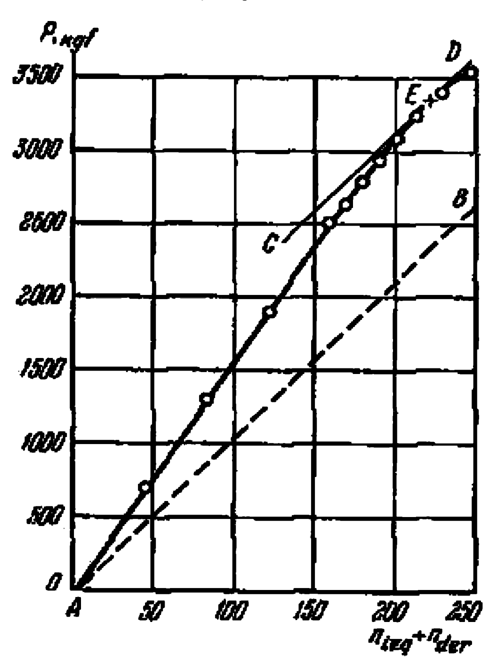


Fig. 12 Determinación gráfica de σ_{pr}.

Un ejemplo de la determinación experimental del límite convencional de fluencia se muestra en la tabla 5. El diámetro de la probeta es $d = 1$ cm. Por consiguiente, el área de la sección es $F = 0,785$ cm². El material es acero al carbono con el valor esperado del límite de fluencia alrededor de 6000 kgf/cm². El extensómetro tiene la base $l = 10$ cm y el aumento $K = 500$. La carga inicial es igual a 500·0,785 = 393 kgf. Tomamos el valor redondeado de 400 kgf. Las lecturas de los extensómetros izquierdo y derecho para esta carga son 10 y 20 respectivamente. La primera carga de prueba se toma igual a 3800 kgf, lo que corresponde al 80% del valor esperado del límite de fluencia. Al descargar hasta la carga inicial, obtenemos las lecturas 22 y 32 (2ª línea de la tabla 5). Los incrementos de las lecturas en com-

Tabla 5

Carga P, en kgf	Lecturas de los extensómetros		Incrementos de las lecturas		Suma de los incrementos, $\Delta n = \Delta n_{izq} + \Delta n_{der}$
	Izquierdo n_{izq}	derecho n_{der}	Δn_{izq}	Δn_{der}	
400	10	20			
			12	12	24
3800	22	32			
			30	28	58
4100	40	48			
			52	50	102
4400	62	70			
			80	75	155
4700	90	95			
			120	125	245
5000	130	145			

paración con las iniciales son 12 y 12. La suma de los incrementos Δn es igual a 24.

Esta magnitud determina un alargamiento permanente de la probeta igual a $\Delta n/2K = 24/2 \cdot 500 = 0{,}024$ mm.

Al límite de fluencia le corresponde el alargamiento permanente $0{,}2 \cdot 0{,}01 l = 0{,}2 \cdot 0{,}01 \cdot 100 = 0{,}2$ mm. Multiplicándolo por el aumento doble del extensómetro, obtenemos $\Delta n_f = 200$, el valor de la suma de los incrementos de lecturas que corresponde al límite de fluencia. Este valor (véase la última columna de la tabla 5) corresponde al intervalo de carga entre 4700 y 5000 kgf. Interpolando, hallamos la carga correspondiente al límite de fluencia

$$P_f = 4700 + \frac{300}{245 - 155}(200 - 155) = 4850 \text{ kgf}.$$

De ahí, el límite de fluencia es

$$\sigma_f = \frac{P_f}{F} = \frac{4850}{0{,}785} = 6150 \text{ kgf/cm}^2.$$

Se puede determinar σ_f inmediatamente después de haber hallado el límite de proporcionalidad en la misma probeta. En este caso, durante la determinación del límite de proporcionalidad hay que bajar un poco la carga inicial (hasta una tensión de alrededor de 500—7000 kgf/cm²) y antes de realizar el ensayo mantener la probeta durante unos cuantos segundos bajo una tensión de cerca de 1000 kgf/cm².

EXPERIMENTO 3. ENSAYO DE COMPRESION DE LOS MATERIALES

1. Datos generales. El objetivo de los ensayos de compresión es el estudio del proceso de compresión de los materiales y la determinación de su resistencia a las cargas de compresión.

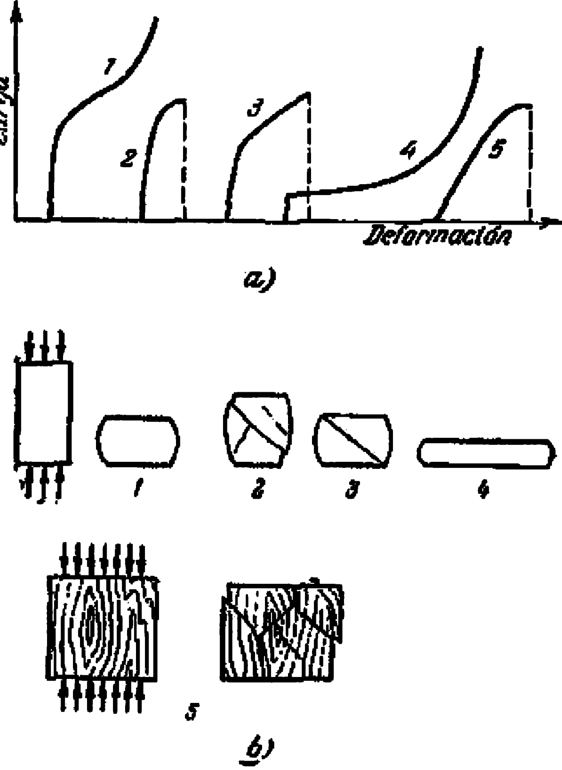


Fig. 13 | *a*, diagramas de compresión: *1*, acero pobre en carbono; *2*, fundición; *3*, dural; *4*, aluminio; *5*, madera. *b*, aspecto general de las probetas de diferentes materiales antes y después del ensayo de compresión: *1*, acero dulce; *2*, fundición; *3*, dural; *4*, aluminio; *5*, roble (durante la compresión a lo largo de las fibras).

En la fig. 13, *a* aparecen los diagramas de compresión obtenidos durante los ensayos de diferentes materiales. Los diagramas están desplazados partiendo del origen de las coordenadas a lo largo del eje de las abscisas para que no se superpongan uno con otro.

El acero pobre en carbono, o acero dulce, es un material plástico. Las dimensiones transversales de una probeta hecha de acero pobre en carbono, aumentan durante la compresión y la longitud de la probeta disminuye sensiblemente, pero su integridad se man-

tiene. Del diagrama de compresión del acero dulce (fig. 13, *a*) se ve que en la etapa inicial existe la proporcionalidad entre la carga y la deformación, luego la deformación crece rápidamente con pequeños aumentos de la carga; después el crecimiento de las deformaciones se hace más lento a causa del aumento de la sección de la probeta.

Las probetas de materiales frágiles durante la compresión se descomponen en pedazos. Por ejemplo, durante el ensayo del hierro fundido las partes de la probeta, al alcanzar la carga de destrucción, se deslizan una por la otra en planos inclinados.

En la fig. 13, *b* se muestra el aspecto general de las probetas de distintos materiales antes y después de su ensayo de compresión. La forma de barril que toman las probetas después del ensayo se explica por la fricción entre los topes de la probeta y los platos de la prensa. El dural se destruye durante la compresión al igual que la fundición, sufriendo desplazamiento por un plano inclinado (fig. 13, *b*, 3), pero le antecede una deformación plástica de consideración: el plano forma con el eje de la probeta un ángulo de alrededor de 45—50°, es decir, coincide aproximadamente con el plano de las tensiones máximas tangenciales. El aluminio se deforma igual que el acero pobre en carbono. Sin embargo, se caracteriza por la manifestación pronunciada de la fluencia después de un pequeño período de proporcionalidad entre la carga y las deformaciones. Durante la compresión de la madera a lo largo de las fibras (fig. 13, *b*, 5), la proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones se observa casi hasta el momento de la destrucción (véase la curva *5* en la fig. 13, *a*). La destrucción de especies duras de madera va acompañada por los desplazamientos en planos inclinados, es decir, en este caso la madera también se destruye a causa de la acción de las tensiones tangenciales.

El ensayo de compresión de los materiales se realiza en máquinas llamadas prensas. A continuación se describe la prensa del sistema de Amsler.

2. Prensa de Amsler con fuerza de hasta 200 tf. La prensa de Amsler (fig. 14) es una máquinas hidráulica de ensayo de compresión. Dicha prensa tiene también un dispositivo para ensayos de flexión.

El esquema de la excitación de fuerza de la máquina se presenta en la fig. 15. Una bomba impelente echa el aceite por los tubos *1* y *2* en el cilindro motor de la máquina. La entrada del aceite se regula a mano mediante la válvula *3* (el aceite sobrante que llega de la bomba, por los tubos *4* y *5* cae en el tanque). El aumento de la presión en el cilindro provoca el levantamiento del émbolo *6* y, por consiguiente, la compresión de la probeta *12* colocada sobre el émbolo. El extremo superior de la probeta se apoya contra el cabezal *7*, montado inmóvilmente Este puede trasladarse

hacia arriba y hacia abajo por las columnas de la *máquina. Antes de empezar el ensayo el cabezal se instala a la altura necesaria mediante* un motor especial y luego se lleva a mano hasta el contacto con la probeta.

El pequeño cilindro *1* (fig. 16) sirve para medir el esfuerzo transmitido por el émbolo sobre la probeta; las tuberías *8* y *9*

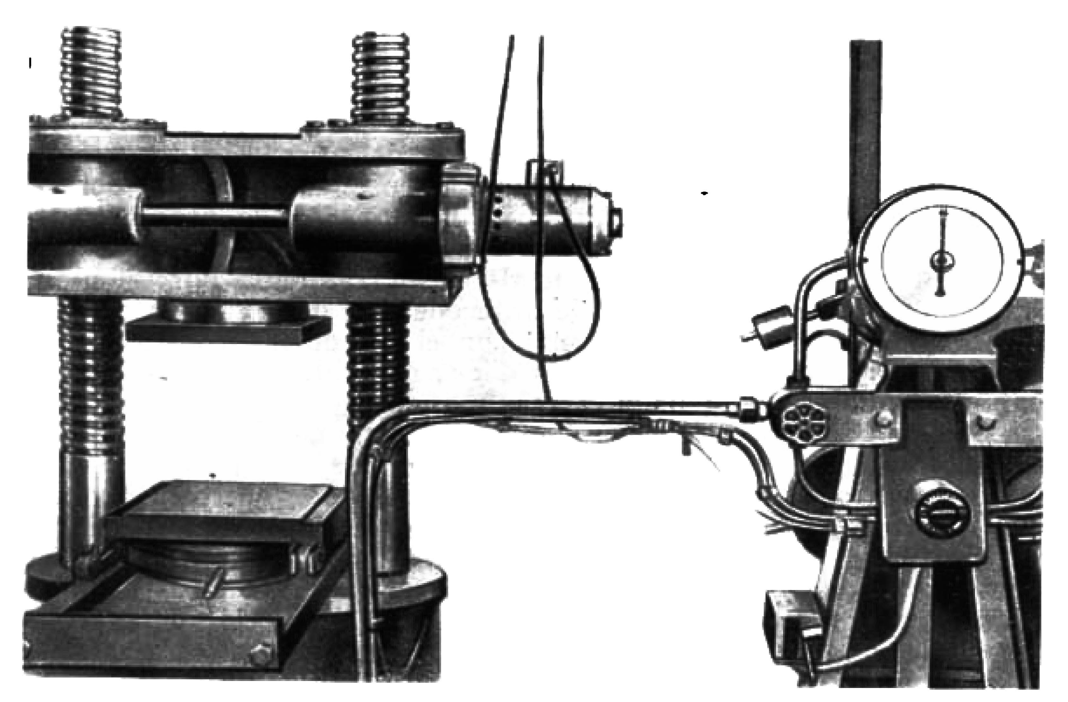


Fig. 14 | Aspecto general de la prensa de Amsler con fuerza de hasta 200 tf.

(fig. 16) unen el cilindro motor de la máquina con el cilindro *1*, cuyo émbolo presiona sobre el estribo *2* y con esto hace girar la varilla del contrapeso de péndulo *Q*. La proyección horizontal del desplazamiento del contrapeso es proporcional a la presión en el cilindro. Como se ve en el esquema (fig. 16), esta proyección también es proporcional al desplazamiento del lápiz *3* sobre el tambor de diagramas *4* a lo largo del eje del tambor. De esta manera, el desplazamiento del lápiz a lo largo del eje del tambor es proporcional a la fuerza que comprime la probeta. La cremallera que porta el lápiz también hace girar simultáneamente el piñón *7* con la aguja que indica la magnitud de la fuerza de compresión sobre una escala circular. La escala debe corresponder a la magnitud del peso *Q*. Al cambiar el peso o su posición en el péndulo (véase,

por ejemplo, la posición *5* mostrada con el punteado), tiene que cambiarse cada vez la escala.

La deformación de la probeta se fija en el diagrama mediante el siguiente dispositivo: al émbolo *6* (fig. 15) está sujetado un hilo que mediante las poleas llega hasta el cuello del tambor de diagramas, lo envuelve y queda tenso después con el peso *6* (fig. 16).

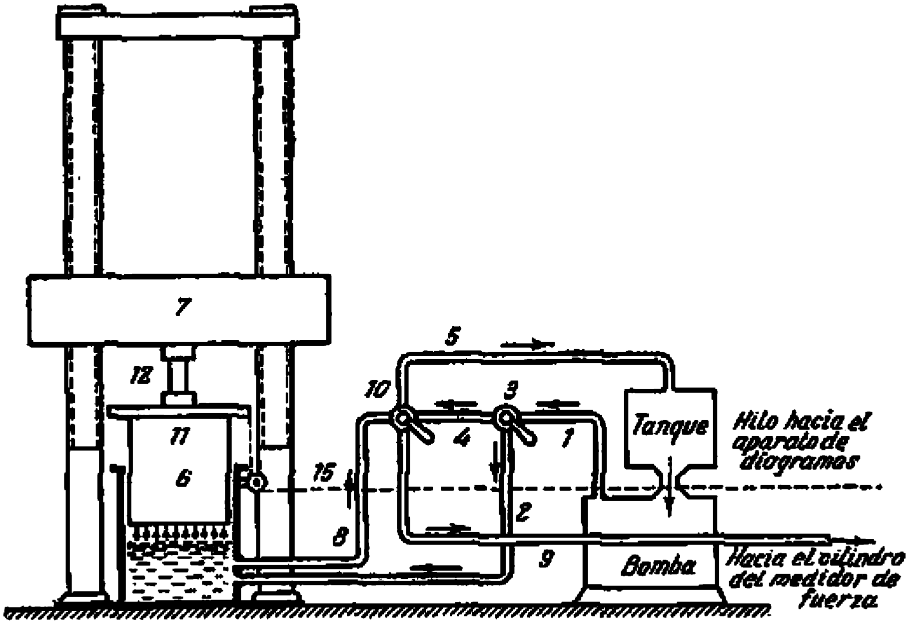


Fig. 15 | Esquema de la excitación de fuerza de la prensa de Amsler con fuerza de 200 tf: *1* y *2*, recorrido del aceite hacia el cilindro motor; *3*, válvula que regula la alimentación de aceite; *4*, *5*, recorrido del aceite «en vacío»; *6*, émbolo motor; *7*, cabezal de apoyo; *8* y *9*, tubería hacia el medidor de fuerza; *10*, válvula para dejar salir el aceite del cilindro, 11, plato — carro, 12 — probeta ensayada.

El desplazamiento del émbolo *6* (fig. 15), igual a la reducción de la probeta, provoca el desplazamiento del hilo y, por consiguiente, el giro del tambor alrededor de su eje, siendo la proyección del desplazamiento de la punta del lápiz respecto al tambor sobre el eje de las abscisas del diagrama dos veces mayor que la reducción de la probeta, porque el diámetro del cuello del tambor es dos veces menor que el diámetro del tambor.

Durante el funcionamiento de la máquina la válvula *10* (fig. 15) está cerrada. Una vez terminado el experimento, se abre esta válvula y el aceite puede pasar de la tubería *8* — *9* a la tubería *5* y de allí al tanque. La presión del aceite baja y los émbolos *6* y *1* vuelven a sus posiciones iniciales.

La fuerza máxima de compresión de la prensa descrita es de 200 tf. Haciendo más pequeño el contrapeso, se puede trabajar con las escalas de 100, 50 y 20 tf. Esto eleva la exactitud de medición de la carga para probetas de poca resistencia. La escala de

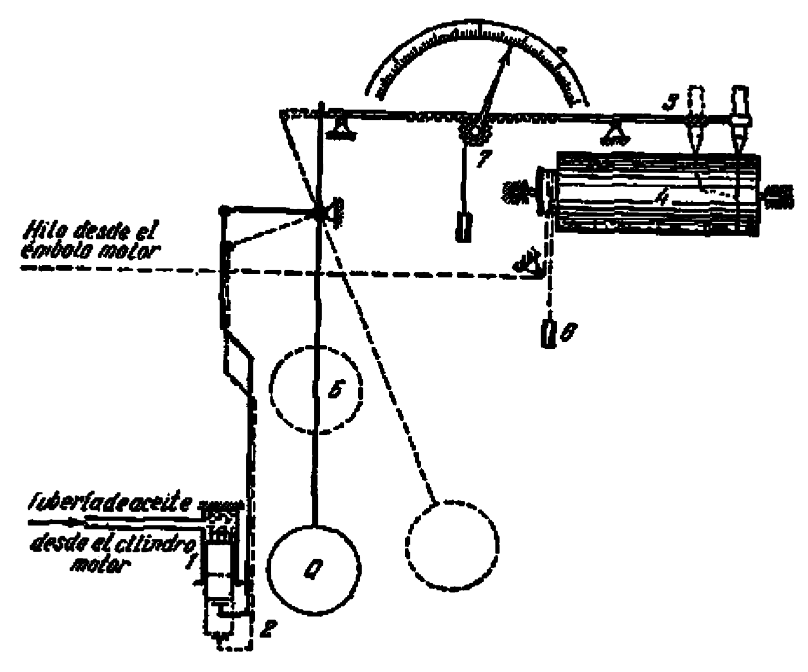


Fig. 16 | Esquema de la medición de fuerza de la prensa de Amsler con fuerza de 200 tf: *1*, cilindro del medidor de fuerza; *2*, estribo del medidor de fuerza; *3*, cremallera corredera con lápiz; *4*, tambor de diagramas; *5*, colocación del peso para ensayar probetas de poca resistencia; *6*, peso que tensa el hilo; *7*, piñón de la aguja que marca la carga; *Q*, peso sobre el péndulo.

cargas en el diagrama es de 20, 10, 5 y 2 tf por centímetro respectivamente.

Al poner en marcha la máquina, hay que tener en cuenta que en la posición de reposo el émbolo *6* está bajado y el plato *11* (fig. 15) se apoya sobre la bancada con sus rodillos. Antes del ensayo se debe, mediante la bomba, levantar previamente el émbolo a tal altura que el plato no se apoye sobre sus rodillos y esté sostenido solamente por el émbolo. Entonces, al bajar el cabezal *7*, la fuerza transmitida por él sobre la probeta ejerce presión sobre el aceite en el cilindro, lo que se registra en seguida por el medidor de fuerza. Al bajar el cabezal *7* solamente se crea una pequeña carga inicial, después de lo cual se deja el cabezal

inmóvil y la siguiente carga de la probeta se efectúa mediante la bomba.

Sobre el ensayo de flexión en la prensa descrita véase el experimento 14.

Tabla 6

Materiales				
Dimensiones de la probeta	Altura h cm			
	Diámetro d, cm			
	Área de la sección F, cm²			
Valor máximo de la fuerza de compresión P, kgf				
Resistencia provisional (para materiales frágiles) σ_p, kgf/cm²				
Tensión máxima (para materiales plásticos) $\sigma_{máx}$, kgf/cm²				
Aspecto de la probeta después del ensayo (dibujo)				

3. Ensayo de los metales. Durante el ensayo de compresión de las probetas metálicas, la anotación en el registro del laboratorio se realiza de acuerdo con la forma dada en la tabla 6.

La resistencia provisional $\sigma_p = P_{máx}/F$ puede ser determinada sólo para los materiales que se destruyen durante la compresión (fundición, duraluminio); para los materiales bastante plásticos (acero dulce, aluminio) que no se destruyen al someterlos a compresión, en la tabla 6 está indicada la tensión máxima $\sigma_{máx} = P_{máx}/F$ hasta la cual ha sido llevado el material durante la prueba.

Al comprimir materiales plásticos hay que observar atentamente el crecimiento de la carga en la última etapa del ensayo para impedir la sobrecarga de la máquina.

4. Ensayo de la madera. La anotación durante el ensayo de compresión de la madera se hace, por ejemplo, según la forma mostrada en la tabla 7.

Al comprimir la madera transversalmente a las fibras, su resistencia depende de la posición de los anillos anuales de madera respecto a la dirección de la acción de la fuerza. Si la dirección de los anillos anuales es paralela a la dirección de la acción de la fuerza de compresión, la resistencia de la madera a compresión es un poco mayor que en el caso de la perpendicularidad de la

Tabla 7

	A lo largo de las fibras		De través de las fibras	
	roble	pino	roble	pino
Area de la sección transversal de la probeta F, cm^2				
Carga de destrucción P, kgf				
Resistencia provisional σ_p, kgf/cm^2				
Aspecto de la probeta después del ensayo (dibujo)				

fuerza a los anillos. En el último caso, el aplastamiento de las capas blandas de la madera origina deformaciones considerables de la probeta (dos veces y más) hasta con cargas insignificantes. Luego la resistencia de la probeta aumenta notablemente, pero ya está reaccionando como si fuera un material nuevo: madera prensada de una densidad homogénea, cuya destrucción se caracteriza por la formación de fisuras inclinadas de deslizamiento.

EXPERIMENTO 4. ENSAYO DE CIZALLAMIENTO

La finalidad del ensayo consiste en determinar la resistencia provisional del material al cizallamiento. Se somete a ensayo el metal (acero o duraluminio) y la madera, mas la madera se ensaya al deslizamiento en el sentido de las fibras.

Tabla 8

Materiales	Área del cizallamiento, F, cm^2	Carga cortante P, kgf	Límite de resistencia al cizallamiento τ_p, kgf/cm^2

La resistencia provisional es igual a la relación de la carga máxima soportada por la probeta durante el ensayo, respecto al área del cizallamiento, es decir,

$$\tau_p = \frac{P_{máx}}{F}.$$

La probeta de metal tiene una forma cilíndrica. Durante el ensayo se inserta en el orificio del dispositivo mostrado en la fig. 17, *a*. La máquina saca el disco *2* de la horquilla *1*, *3*, a causa de lo cual se realiza el desplazamiento de la parte media de la probeta respecto a sus partes extremas. El área de trabajo *F* (área del cizallamiento) es igual al área doble de la sección transversal de la probeta, porque el cizallamiento sucede en dos planos simultáneamente.

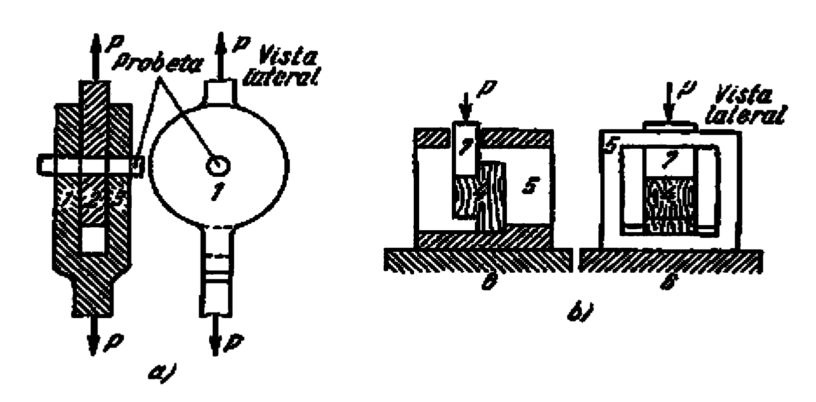


Fig. 17 | **Ensayo de deslizamiento: *a*, de la probeta métálica; *b*, de la probeta de madera.**

El ensayo se efectúa en la máquina ГЗИП P-5 (GZIP R-5) (véase el experimento 20) o en otra máquina de pruebas de ruptura.

Para la prueba de deslizamiento de la madera se emplea la probeta *4* mostrada en la fig. 17, *b*. Se utilizan también probetas de otra forma. La probeta *4* se pone dentro de la caja *5* que se coloca sobre el plato inferior *6* de la prensa. El plato superior ejerce presión desde arriba sobre la pieza *7* que pasa por la ranura en la caja; con su extremo inferior la pieza se apoya contra el saliente en la probeta, la cual al aplicar la carga de destrucción, sufre un deslizamiento, es decir, se desplaza en el sentido de las fibras respecto a la parte restante de la probeta.

El ensayo de la madera al deslizamiento se realiza en máquinas con una fuerza de 5 a 10 tf.

La anotación en el registro del laboratorio durante el ensayo de los materiales al cizallamiento y al deslizamiento se hace de acuerdo con la forma indicada en la tabla 8.

La madera opone resistencia diferente a la fuerza de deslizamiento en dependencia de la dirección de acción de la fuerza respecto a las fibras y las capas de la madera.

EXPERIMENTO 5. DETERMINACION DEL MODULO DE POISSON

1. Datos generales. Una probeta sometida a tracción o compresión en el sentido de su eje, se deforma también en dirección perpendicular al eje. El valor absoluto de la relación de la deformación transversal relativa ε_1 a la deformación longitudinal relativa ε de la probeta se llama coeficiente de deformación transversal o módulo de Poisson. Por lo regular se designa con la letra μ.

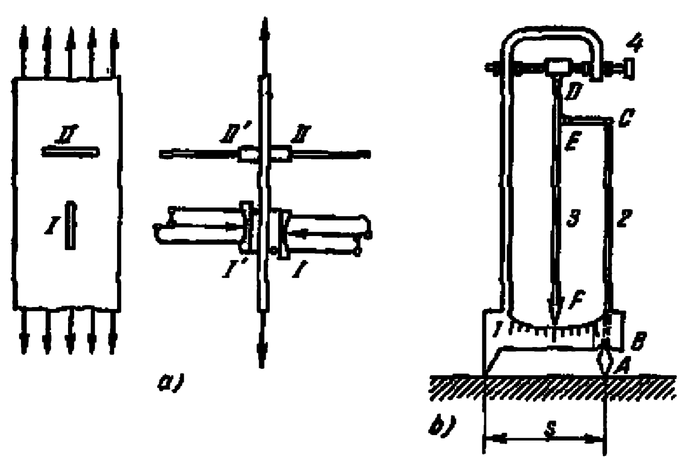


Fig. 18 | *a*, ubicación de los extensómetros sobre la probeta durante la determinación del módulo de Poisson: *b*, esquema del extensómetro de palanca; *1* plancha; *2* y *3*, sistema de palancas; *4*, tornillo de ajuste.

El valor del módulo de Poisson se aproxima a 0,3 para la mayoría de los metales. Para el acero su valor medio obtenido de múltiples experimentos, es de 0,28 y varía dentro de los límites de 0,25 a 0,30. Para el dural el valor medio es de 0,34; los valores extremos son 0,31 y 0,36.

La magnitud del módulo de Poisson es la misma tanto para la tracción, como para la compresión y el signo del esfuerzo no influye sobre el valor de μ. Para el ensayo de tracción se utilizan probetas planas traccionadas en la máquina de 1,5 tf (véase el § 13 en la parte II) o en otras máquinas para ensayos de rotura. La probeta para el ensayo de compresión es un paralelepípedo rectangular. El experimento se hace en una prensa potente (véase la descripción de una prensa de 200 tf en el experimento 3).

La medición de las deformaciones se realiza mediante los extensómetros descritos más adelante (véase también el experimento 30).

Sobre la probeta se instalan dos extensómetros para medir las deformaciones longitudinales (extensómetros *I* y *I'* en la fig. 18, *a*) y otros dos para medir las deformaciones transversales (extensómetros *II* y *II'*). Las deformaciones incógnitas se determinan como el promedio de las indicaciones de ambos extensómetros, teniendo en cuenta la posible excentricidad de la fuerza que tracciona (o comprime) la probeta y, por consiguiente, una distribución no uniforme de las tensiones en la probeta.

Durante el ensayo hay que evitar marchas muertas de los instrumentos, haciendo con este fin el cambio de la carga solamente en un sentido (que en general corresponde al crecimiento de la carga). Una vez terminado el experimento, se deben comprobar las lecturas iniciales.

2. Extensómetro de Guggenberger. El extensómetro de Guggenberger es el más difundido de los extensómetros de palanca. La estructura del extensómetro aparece en la fig. 18, *b*. La plancha *1* se fija en la superficie de la probeta, cuyas deformaciones se han de medir (en el dibujo esta superficie está sombreada), mediante una mordaza (representada aparte en la fig. 19, *a*). Los dos apoyos de la plancha *1* son los siguientes: uno inmóvil en forma de cuchillo (a la izquierda) y un prisma de sección romboidal (a la derecha), al que está sujetada rígidamente la barra *2*. Al variarse la distancia s entre los puntos de apoyo a causa de la deformación de la probeta, se inclina el prisma y junto con él la barra *2*. Con todo esto, el giro del prisma y de la barra *2* sucede alrededor de la arista B del prisma, donde la plancha *1* se apoya contra el prisma. El extremo superior C de la barra *2* está unido articuladamente mediante la gemela CE con la aguja *3* que tiene un apoyo articulado en el punto D. La traslación del punto C al girar la barra *2* provoca igual traslación del punto E de la aguja *3*. La aguja gira alrededor de su apoyo D y su extremo inferior F se desplaza a lo largo de una escala milimetrada puesta sobre la plancha *1*. La translación Δn de la aguja, por supuesto, es proporcional a la variación Δs de la longitud s. La relación de la diagonal AB del prisma a la longitud de la barra *2* suele ser igual a 1/50; la relación de las longitudes de los tramos DE y EF de la aguja es alrededor de 1/20, es decir, el aumento del extensómetro K es alrededor de 1000. El aumento de cada extensómetro se determina mediante su calibración en un calibrador especial.

El punto de apoyo D de la aguja se encuentra en la corredera y puede trasladarse mediante el tornillo *4*; esto permite poner la aguja antes del ensayo en la lectura deseada, al igual que seguir ensayando sin trasladar el extensómetro por acabarse la escala.

La distancia s entre los puntos de apoyo se llama base del extensómetro y generalmente es igual a 20 mm. La base del ex-

tensómetro puede ser ampliada mediante una plancha supletoria llamada alargador de base.

La fijación de los extensómetros en la probeta se realiza mediante mordazas (fig. 19, *a* y *b*). En el caso de probetas voluminosas utilizar mordazas de apoyo tiene sus dificultades. Entonces

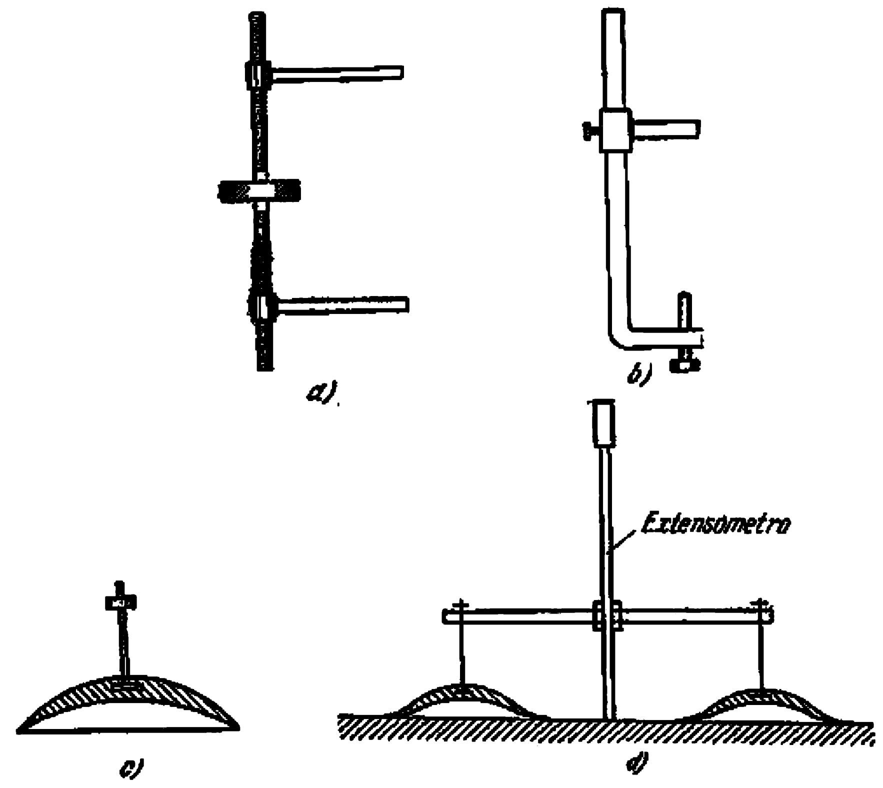


Fig. 19 | Dispositivos para la sujeción de los extensómetros: *a*, mordaza de unión para dos extensómetros; *b*, mordaza para un extensómetro; *c*, ventosa de goma en estado libre; *d*, dos ventosas en estado de trabajo (que mantienen el extensómetro).

pueden emplearse las ventosas. La ventosa es una tacita esférica hecha de goma (fig. 19, *c*), con bordes finos, que tiene un diámetro de la circunferencia de apoyo de 25 a 40 mm. Si apretamos la tacita contra una superficie plana o poco torcida, se adhiere a ésta, porque dentro de la ventosa se forma el vacío y resulta apretada por la presión exterior. Tal ventosa puede servir de apoyo para sujetar el extensómetro. En la fig. 19, *d* se muestran dos ventosas entre las cuales está instalado el extensómetro de Guggenberger. En la parte exterior cada ventosa tiene tirantes con rosca para las tuercas, mediante éstas se sujeta la mordaza

transversal que aprieta el extensómetro. La instalación del extensómetro mediante las ventosas es unilateral respecto a la probeta en ensayo y por esto es apta para cualquier dimensión de la probeta o del modelo investigado. La superficie del modelo sobre la cual se instalan las ventosas tiene que ser engrasada con vaselina, grasa consistente u otro tipo de grasas.

3. **Realización del experimento e interpretación de los datos.** Se somete la probeta a una carga inicial P_1, se toman las lecturas n_1 de los extensómetros y se anotan en el registro de laboratorio según la forma indicada en la tabla 9. Luego se aumenta la carga (dentro de los límites de la elasticidad) a tal grado que se obtengan cambios visibles de las lecturas Δn de los extensómetros, y se vuelven a tomar las lecturas (n_2). Los extensómetros *I* y *I'* que miden los alargamientos longitudinales marcan el incremento de las lecturas, y los extensómetros *II* y *II'* que miden los acortamientos transversales, la disminución de las lecturas.

A veces se aumenta la carga en varias etapas comprobando con esto la proporcionalidad entre la carga sobre la probeta y su deformación. En el caso de que los alumnos realicen el experimento 2, pueden limitarse, para abreviar los cálculos, a un escalón de carga en este experimento y en la mayoría de los siguientes.

A base de los datos obtenidos mediante los extensómetros *I* y *I'* se calcula el valor medio del alargamiento longitudinal Δs_I de la probeta (en una longitud s, igual a la base del extensómetro). De los datos obtenidos en los extensómetros *II* y *II'*, se deduce el acortamiento transversal medio Δs_{II}.

Tabla 9

Extensómetros que miden las deformaciones	№	Lecturas de los extensómetros: n_1 carga P_1	Lecturas de los extensómetros: n_2 carga P_2	Incremento de lecturas de los extensómetros $\Delta n = n_2 - n_1$	№ del extensómetro (fabril)	Base del extensómetro s	Aumento del extensómetro K	Alargamiento $\Delta s = \frac{\Delta n}{K}$	Valor medio del alargamiento
longitudinales	*I*								$\Delta s_I =$
	I'								
transversales	*II*								$\Delta s_{II} =$
	II								

Las bases de los extensómetros suelen ser iguales. Entonces,

$$\mu = \frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_I} = \frac{\frac{\Delta s_{II}}{s}}{\frac{\Delta s_I}{s}} = \frac{\Delta s_{II}}{\Delta s_I},$$

es decir, el módulo de Poisson se obtiene como la relación de las deformaciones absolutas.

Durante el ensayo de compresión los extensómetros transversales II y II' indican el aumento de las lecturas, mientras que los extensómetros I y I', por el contrario, señalan disminución de las lecturas.

EXPERIMENTO 6. ENSAYOS DE RESISTENCIA EN EL CASO DE TENSIONES ALTERNAS (RESISTENCIA A LA FATIGA)

Las cargas alternas repetidas y las tensiones que surgen debido a ellas, varían en el tiempo según una ley determinada. El cambio de las tensiones que toman todos los valores repetidos periódicamente en todos los demás cambios, se llama ciclo (fig. 20, *a*).

El ciclo se caracteriza por las siguientes magnitudes: tensiones máxima $p_{máx}$ y mínima $p_{mín}$ (normal σ o tangencial τ), tensión media

$$p_m = \frac{p_{máx} - p_{mín}}{2}$$

amplitud del ciclo

$$p_a = \frac{p_{máx} - p_{mín}}{2}$$

y coeficiente de asimetría del ciclo

$$r = \frac{p_{mín}}{p_{máx}}.$$

En el caso de las tensiones extremas iguales pero de signo contrario $|p_{máx}| = |p_{mín}| = p_a$ tiene lugar el ciclo simétrico: su coeficiente de asimetría $r = -1$ y la tensión media $p_m = 0$ (fig. 20, *b*).

El ciclo no simétrico que tiene $p_{mín} = 0$, $p_m = p_a = \frac{p_{máx}}{2}$ y $r = 0$, se llama pulsante o que empieza en cero (fig. 20, *c*).

Se puede considerar la carga estática como el caso límite del ciclo no simétrico cuando $p_{máx} = p_{mín} = p_m$, $p_a = 0$ y $r = 1$.

La destrucción de los materiales a causa de las tensiones periódicas de variación repetida (en orden de millones de ciclos), difiere mucho de la destrucción a causa de la acción de las cargas

estáticas o las que se repiten pocas veces. Con tensiones alternas hasta la destrucción de los materiales plásticos sucede de repente, sin deformación plástica visible. La tensión de destrucción es mucho menor que la resistencia provisional y a veces se halla incluso por debajo del límite de elasticidad del material. Mucho antes de la destrucción empieza el proceso de desarrollo paulatino de fisuras microscópicas que aparecen en algunas cristalitas y luego se transforman en una fisura grande extendida sobre una parte considerable de la sección. La superficie donde ocurre la

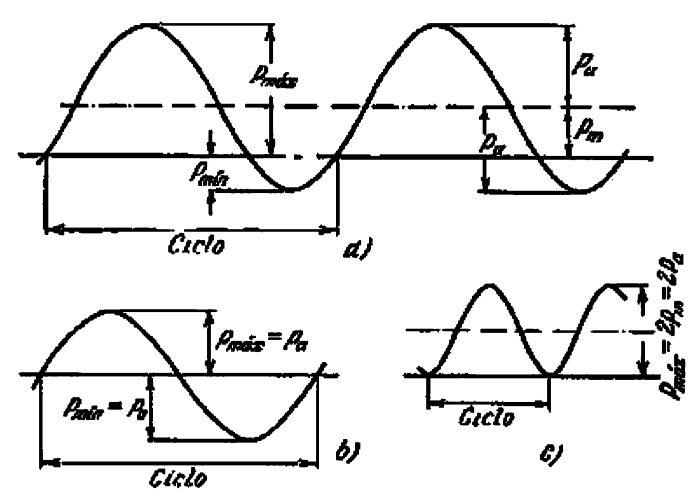


Fig. 20 | Característica de los ciclos de tensiones alternas: *a*, ciclo asimétrico; *b*, ciclo simétrico; *c*, ciclo pulsante.

destrucción tiene dos zonas bien expresadas: una pulida, esmerilada que es la zona de propagación de la fisura, y otra granulada que es la zona de la fractura directa en la parte de la sección debilitada por la fisura.

Se llama fatiga el estado del material cuando las tensiones alternas provocan un desarrollo progresivo de las fisuras que lleva a la destrucción.

La duración del proceso que precede a la destrucción del material a causa de las tensiones alternas, determinó el nombre de fatiga del material, aunque éste no refleja la esencia física del fenómeno.

La capacidad del material para resistir la destrucción en presencia de tensiones alternas (la destrucción por fatiga) se llama resistencia a la fatiga. Se caracteriza por el límite de fatiga (o límite de resistencia a la fatiga), tensión máxima repetida periódicamente, con la cual el material no se destruye después de una cantidad bastante grande de ciclos.

Para los aceros se considera bastante grande el número $N = 10$ millones de ciclos; con un mayor número de ciclos la destrucción no ocurre prácticamente nunca. Los metales no ferrosos se caracterizan por el límite convencional de resistencia a la fatiga que corresponde a $N = 500$ millones de ciclos, porque, a medida que se aumenta N, su destrucción tiene lugar con la tensión un poco rebajada.

El límite de resistencia a la fatiga determina la resistencia del material durante la acción de las cargas alternas. El factor más desfavorable, que disminuye considerablemente la resistencia a la fatiga, es la concentración de grandes tensiones locales que favorecen la aparición y el rápido desarrollo de las fisuras de fatiga. Los cambios bruscos de las secciones (aristas huecas, agujeros, ranuras, salientes, etc.), irregularidades y deterioros de la superficie (elaboración aproximada, rasguños, cortes, etc.), defectos interiores (inclusiones de escoria, huecos, etc.) determinan una concentración grande de tensiones locales.

La resistencia a la fatiga también depende de la asimetría del ciclo de las tensiones alternas y del tipo del estado de tensión. El límite mínimo de resistencia a la fatiga resulta para el ciclo simétrico que se denota por p_{-1}. Para los demás ciclos, el valor del límite de resistencia a la fatiga p_r está dentro del intervalo entre p_{-1} y la resistencia provisional p_p.

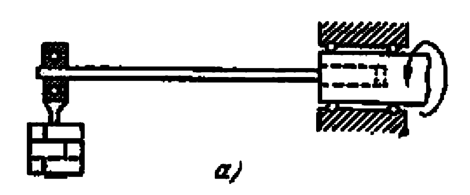
Los ensayos de resistencia a la fatiga se realizan para los estados de tensión simples obtenidos mediante la tracción (compresión) alterna repetida, flexión o torsión y a veces para el estado de tensión compuesto causado por la flexión y la torsión simultáneas o por tracción en dos sentidos.

Las tensiones alternas de ciclo simétrico durante la flexión de una probeta giratoria son las que se realizan más fácilmente. Tales condiciones se logran cuando una probeta redonda se fija rígidamente en un mandril (fig. 21, *a*) y se pone en movimiento giratorio con una velocidad determinada. Del extremo libre de la probeta se suspende, por medio de un cojinete, un peso constante que provoca la tracción de las fibras superiores y la compresión de las inferiores. La rotación de la probeta determina el cambio de estas tensiones. En semejantes condiciones funcionan los ejes de las ruedas. Para excluir la influencia de las tensiones tangenciales, se crea la flexión pura que surge al cargar la viga que gira en dos cojinetes de apoyo, con dos fuerzas simétricas (fig. 21, *b*). La viga está compuesta por la probeta ubicada en su parte media y dos mandriles de apoyo en los extremos.

Las tensiones alternas durante la tracción (compresión) o la torsión se crean debido a las fuerzas de inercia o los mecanismos de biela y manivela, según la construcción de la máquina de ensayo. Para cargas alternas muy grandes se utilizan pulsadores de

acción hidráulica, mecánica o neumática, montados junto con las máquinas corrientes de ensayo.

El propósito principal de los ensayos de resistencia a la fatiga consiste en determinar el límite de resistencia a la fatiga. Conociendo este límite, se puede determinar la resistencia del material en el estado que tiene como artículo hecho y conforme a aquellas influencias a que está sometido en las máquinas en función.



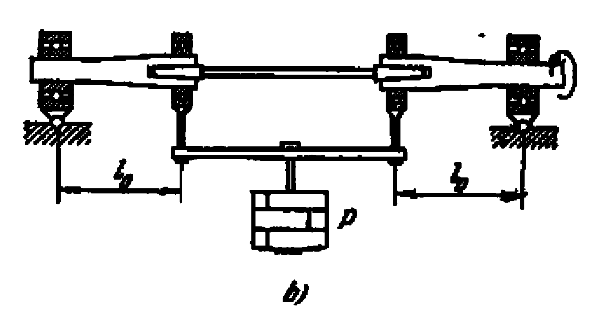


Fig. 21 | Ensayo de probeta giratoria: *a*, carga del voladizo para provocar flexión; *b*, flexión pura.

El ensayo de resistencia a la fatiga adquiere gran importancia en lo referente al cambio de la solidez del material bajo la influencia de factores tales, como la concentración de las tensiones, el método de elaboración, el tamaño de la pieza, etc. La influencia de estos factores no se refleja en los resultados de los ensayos estáticos para determinar las características mecánicas del material y se detecta sólo mediante los ensayos de fatiga. La seguridad de los resultados de los ensayos se logra con un planteamiento adecuado que trate de reproducir lo más fielmente posible el trabajo del material en las condiciones de explotación. Es necesario evitar la influencia de factores casuales sobre el resultado de los ensayos, así como también tomar en consideración la gran sensibilidad de los materiales, sobre todo de los metales, a cualquier tipo de defectos y deterioros que disminuyen su resistencia a la acción de las cargas alternas.

De aquí se desprende la extraordinaria importancia que tiene

en estas condiciones la elección y preparación de las probetas. Para el ensayo de resistencia a la fatiga se utilizan ante todo probetas pulidas con un diámetro de 7,5 mm, fabricadas del mismo material, por ejemplo, de acero de la misma fusión.

Para cada ensayo se necesita una serie de probetas, de igual forma y de material homogéneo, por lo regular en cantidad de 6 a 12 piezas. Es imposible obtener un valor seguro del límite de fatiga con el ensayo de una o dos probetas.

Una particularidad del ensayo de resistencia a la fatiga es también su duración. Por ejemplo, para ensayar una sola probeta incluso en una máquina muy rápida que dé hasta 30 000 ciclos por minuto, se necesitan 5—7 horas. Para una partida de probetas hay que emplear varios dias. El ensayo de cada probeta tiene que realizarse en forma continua, porque las interrupciones pueden influir sustancialmente sobre los resultados finales.

Se distiguen dos tipos de ensayos: prolongados y acelerados. Los primeros brindan la posibilidad de determinar directamente el límite de resistencia a la fatiga a base de los resultados de ensayos de una serie de probetas. Los segundos permiten de una manera indirecta determinar aproximadamente la magnitud del limite de resistencia a la fatiga, basándose en los resultados de ensayos de una probeta.

Mediante ensayos prolongados se determina la dependencia del número N de ciclos con respecto de la magnitud variable del ciclo máximo $p_{máx}$, necesario para la destrucción de la probeta. En general, esta dependencia se presenta gráficamente en forma del llamado diagrama de la fatiga (curva de Wöhler).

Antes de efectuar el ensayo, se colocan las probetas en una máquina especial que realiza la carga alterna, cuyo accesorio obligado es el contador de ciclos. Tiene que desconectarse automáticamente al destruirse la probeta.

La primera probeta se ensaya con la tensión máxima del ciclo que forma una parte de la resistencia provisional. Para los aceros se toma $p_{máx} \approx 0{,}6p_p$, para los metales no ferrosos y aleaciones ligeras $p_{máx} \approx 0{,}4p_p$. Debe ser fijado el número N de ciclos, con el cual fue destruida la probeta.

Para cada probeta siguiente se disminuye la tensión máxima del ciclo en 400—200 kgf/cm² en dependencia de la rapidez de destrucción de la probeta anterior y la precisión deseada de determinación del límite de resistencia a la fatiga. En este caso, el número de ciclos necesario para la destrucción, aumenta progresivamente. En último término se halla la tensión (tomada por el límite de resistencia a la fatiga) que resiste la última probeta sin destruirse durante un número dado de ciclos, llamado *base de ensayos*. Según el GOST 2860-65 (normas estandardizadas), la

Tabla 10

№	Probeta		Carga			Momento flector, kgf/cm	Tensión, kgf/cm²	Tiempo de ensayo		Indicaciones del contador	Número de ciclos hasta la destrucción, N
	diámetro, cm	módulo de la sección, cm³	suspensión, kgf	pesas, gf	total: suspensión y pesas, kgf			inicio	final		

Límites de resistencia a la fatiga . . . . kgf/cm²

base de ensayos para los aceros en condiciones normales se toma igual a 10 millones de ciclos, para los metales no ferrosos, igual a 100 millones. En caso de ensayos comparativos se permiten las bases, iguales a $5\cdot10^6$ y $20\cdot16^6$ ciclos respectivamente.

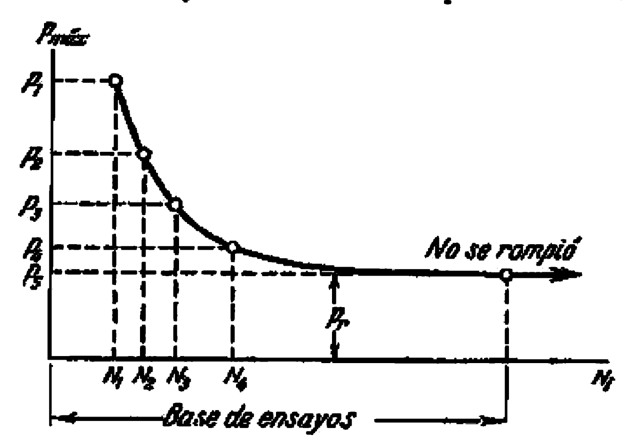


Fig. 22 | Diagrama de la fatiga (Wöhler).

Todos los resultados de los ensayos a flexión de una probeta giratoria se anotan en el registro de laboratorio, cuya forma se representa en la tabla 10.

El diagrama de la fatiga (fig. 22) se construye por puntos de ordenadas p_i, iguales a la tensión máxima dada del ciclo $p_{máx}$, y abscisas, iguales respectivamente a los números obtenidos en el

experimento N_t de ciclos, con los cuales ocurrió la destrucción de la probeta seguida.

La curva de Wöhler obtenida al principio, desciende bruscamente, luego la pendiente se hace más suave, y la curva va acercándose asintóticamente a un valor constante de la tensión que es el límite de resistencia a la fatiga del material.

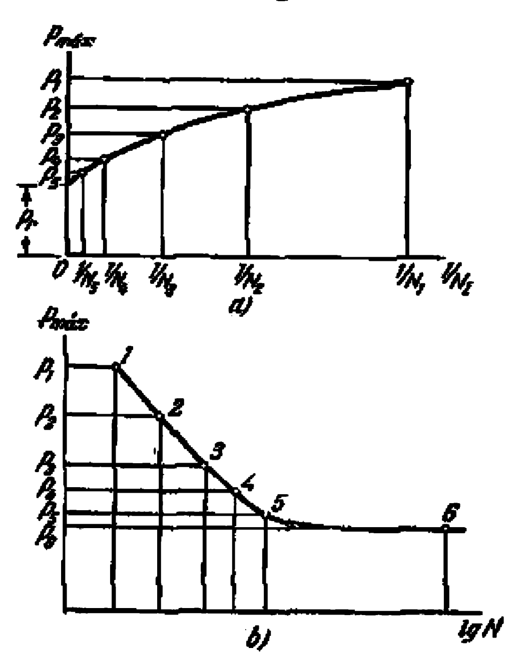


Fig. 23 | Diagramas de la fatiga: *a*, en función de la magnitud de $1/N$ (N es el número de ciclos); *b*, en coordenadas semilogarítmicas.

También existen otros métodos para construir la curva de la fatiga. A veces, en vez del número de ciclos N_t, se coloca en el eje de las abscisas su cantidad recíproca $1/N_t$ (fig. 23, *a*). Con tal construcción las ordenadas de la curva van disminuyendo hacia el origen de los ejes de coordenadas: extrapolando la curva hasta la intersección con el eje de las ordenadas, se obtiene el límite de resistencia a la fatiga que corresponde al valor $1/N=0$. Este método puede utilizarse para determinar aproximadamente el límite de resistencia a la fatiga a base de los resultados de los ensayos de tres o cuatro probetas.

Últimamente, a menudo se representan las curvas de la fatiga en coordenadas semilogarítmicas, colocando lg N sobre el eje de las abscisas, y sobre el eje de las ordenadas como antes el valor de $p_{máx}$ en la escala lineal (fig. 23, *b*). Resulta una curva de dos

tramos casi rectos con una inflexión. La intersección de las rectas determinará el límite de resistencia a la fatiga. Para los metales ferrosos después de la inflexión la curva se extiende horizontalmente, lo que permite determinar el límite de resistencia a la fatiga con gran precisión. La curva para los metales ligeros no ferrosos sigue teniendo después de la inflexión una inclinación leve hacia el eje de las abscisas, lo que conduce al límite convencional de resistencia a la fatiga.

Los ensayos acelerados se realizan generalmente con la flexión pura de la probeta giratoria (fig. 21, *b*). Dichos ensayos están

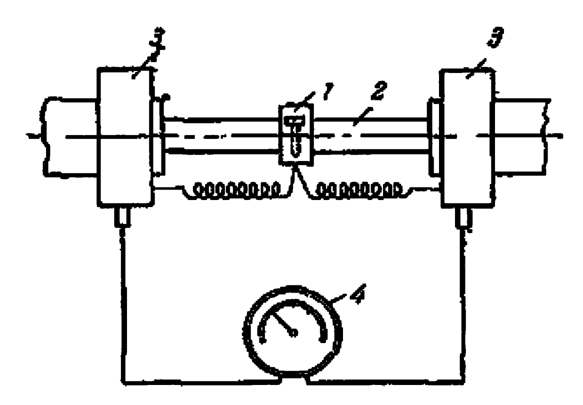


Fig. 24 | Medición de la temperatura durante el ensayo acelerado de resistencia a la fatiga: *1*, anillo de latón con el par termoeléctrico; *2*, probeta; *3*, colectores; *4*, milivoltímetro.

basados en una propiedad de los materiales denominada a veces fluencia cíclica. Esta propiedad se manifiesta en un aumento brusco de flechas, del momento torsional, de la temperatura, de la energía de deformación y de los demás parámetros que caracterizan el estado de la probeta al alcanzar la tensión máxima del ciclo un valor determinado, muy próximo al límite de resistencia del material a la fatiga.

Tanto la probeta como la máquina de ensayo se dotan de un par termoelécrico, fleximetros, un miliamperímetro para medir la energía gastada y un dispositivo que fija el valor del momento torsional.

El par termoeléctrico que por lo general es de hierro y constantán, se suelda en el anillo de latón *1* compuesto por dos mitades unidas por tornillos y que abrazan fuertemente la probeta ensayada *2* en su parte media (fig. 24). Los microconductores del par termoeléctrico se unen con sus otros extremos a dos colectores *3* en forma de anillos de latón con una temperatura constante que también giran junto con la probeta. La corriente que surge

en los microconductores al cambiar la temperatura de la probeta, se conduce, mediante alambres, de las escobillas de los colectores al milivoltímetro 4, en cuya escala se establece previamente una graduación en milivoltios y grados.

En el bastidor de la máquina se fijan los fleximetros en forma de dos indicadores de reloj sobre la sección que corresponde a los puntos de aplicación de la carga de flexión.

El gasto de la energía (potencia) para la deformación que varía repetidamente de la probeta, puesta en rotación con un motor elécrico, es igual al producto de la intensidad de la corriente que alimenta el motor por su voltaje, es decir,

$$W = IV.$$

Para evitar la influencia de las oscilaciones del voltaje en la red, el motor de la máquina se alimenta por medio de un generador especial que tiene corriente con un voltaje estrictamente constante. Entonces la potencia se cambia proporcionalmente a la intensidad de la corriente y se registra con el miliamperímetro, conectado en la red de alimentación.

El momento torsional que varía a causa de la elevación de la resistencia a la rotación de la probeta al aumentar su carga, se determina por el ángulo de desviación del estator del motor. Por esto el estator se monta en unos cojinetes que le permiten moverse alrededor del eje de rotación del rotor; además tiene en su parte inferior un saliente de plomo. De tal manera, el estator sirve a la vez de manómetro de péndulo que mide la magnitud del momento torsional. La escala de los momentos está situada en el cuerpo del estator y la aguja de indicación está unida rígidamente al bastidor de la máquina.

Para el ensayo se hace la regulación de la probeta colocada en los mandriles de tal manera que no tenga batimiento. Para esto se pone la máquina en marcha con la probeta no cargada y en los indicadores se registra la excentricidad del eje de rotación, que no debe sobrepasar $+0{,}02$ mm; en el caso contrario, se para la máquina y cambia la probeta de posición, tratando de eliminar la excentricidad. Luego se da a la máquina el número normal de revoluciones y ésta tiene que funcionar sin carga durante 15—20 minutos. Con la marcha establecida de la máquina se anotan las indicaciones de todos los aparatos en el registro de ensayos según la forma mostrada en la tabla 11.

La carga de la probeta se efectúa en forma escalonada, de acuerdo a la tensión $\sigma = 400$ kgf/cm² que se calcula por la fórmula

$$\sigma = \frac{Pl_0}{2W_x},$$

Tabla II

Máquina . . . . Material . . . .
Diámetro de la probeta $d = \ldots$ cm Módulo de la sección $W_x = \ldots$ cm³

№	Carga P, kgf	Tensión σ, kgf/cm²	Flecha, mm			Momento torsional M_{tor}, kgf·cm	Temperatura, $t°$	Potencia W, kgf·cm
			f izq	f der.	Flecha media f			

donde P es la carga y l_0 es la distancia desde los apoyos hasta los puntos de aplicación de las fuerzas de flexión (fig. 21, b).

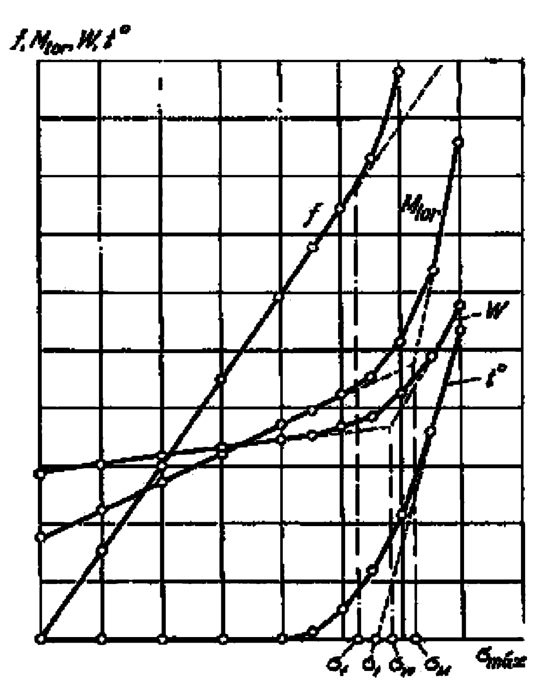


Fig. 25 | Curvas de los ensayos acelerados de resistencia a la fatiga.

En cada escalón de carga la máquina tiene que funcionar de 2 a 6 minutos, después de lo cual se anotan las indicaciones de los instrumentos. Al irse aproximando al límite supuesto de resistencia a la fatiga, se disminuye el escalón de carga hasta $\sigma = 100$ kgf/cm². Se sigue ensayando hasta alcanzar la fluencia

cíclica del material que se caracteriza por el brusco aumento de todos los parámetros medidos casi sin crecimiento de la carga.

A base de los resultados de los ensayos se construyen las curvas de las magnitudes f, M_{tor}, $t°$ y W en función de la tensión máxima del ciclo $\sigma_{máx}$ (fig. 25). Las cuatro curvas obtenidas tienen al principio un tramo rectilíneo y a determinada tensión sufren una notoria inflexión en forma de un brusco ascenso. El límite de resistencia a la fatiga se determina por las abscisas de los puntos de intersección de los tramos rectilíneos iniciales con las tangentes a los últimos tramos de las curvas correspondientes, menos la curva de flecha f. Para esta curva se toma la tensión que corresponde al extremo del tramo rectilíneo. El promedio de los cuatro valores particulares hallados se toma por el límite de resistencia a la fatiga del material.

Los ensayos acelerados detectan la resistencia a la fatiga de todo el volumen del material sometido a la deformación y dan un valor medio del límite de resistencia a la fatiga. La coincidencia de los resultados de los ensayos acelerados y prolongados solamente es posible cuando no existen deterioros exteriores e interiores y otros focos de concentración de las tensiones, y también para los materiales con una viscosidad cíclica grande. Por eso los ensayos acelerados sirven sólo para la determinación aproximada del límite de resistencia a la fatiga y no pueden sustituir los ensayos prolongados que hasta ahora son el único medio seguro para tener una idea sobre la resistencia del material en diversas condiciones de su trabajo.

EXPERIMENTO 7. DETERMINACION DE LA DUREZA

1. Datos generales. La determinación de la dureza es uno de los ensayos mecánico-tecnológicos más importantes. Se ha difundido ampliamente el uso de ensayos mecánicos de la dureza. Esto se explica por la rapidez y la sencillez de dichos ensayos, por los pequeños tamaños de las probetas, el bajo costo y la facilidad de transporte del equipo necesario, al igual que por la posibilidad de efectuar los ensayos en artículos fabricados sin tener que destruirlos.

Por dureza se entienden las diversas características de la resistencia que ofrece el metal a una deformación local, concentrada en un volumen reducido, en su superficie exterior o en la superficie de su corte. El ensayo de dureza siempre se efectúa sobre la superficie de la probeta y consiste en la penetración en ella de otro cuerpo, más duro que el metal ensayado. La dureza se determina como resultado de la comunicación al metal de alguna deformación plástica en un volumen pequeño. Son múltiples los métodos y las condiciones de obtención de la deformación al deter-

minar la dureza. Por lo tanto, existen varios métodos de determinación de la dureza que difieren entre sí por la forma del cuerpo que penetra y los métodos de penetración.

Una condición general para cualquier método de determinación de la dureza es que se efectúa una presión mecánica, concentrada sobre la superficie de la probeta, ejercida en el método dado por un mismo cuerpo de dimensiones y forma determinadas e invariables bajo la carga.

De esta manera, se entiende por dureza la resistencia a la deformación sobre la superficie del cuerpo bajo una acción mecánica, establecida anteriormente, de otro cuerpo más duro de forma y tamaño dados, invariables durante el ensayo.

Los valores que caracterizan la dureza se llaman *números de dureza*. Determinados por medio de diferentes métodos, son distintos tanto por el valor como por la dimensión y siempre van acompañados por la indicación del método de su determinación.

Los siguientes métodos son los que han obtenido la mayor aplicación: penetración estática de una bola de acero (Brinell), de conos de diamante (Rockwell) o de una pirámide, y el rebote de un martillo que se deja caer (Shore). De los demás métodos podemos señalar el de rayar el metal con un cono de diamante, la penetración dinámica de una bola de acero u otra punta. La determinación de la dureza se realiza mediante instrumentos especiales (véase el capítulo IX).

Ultimamente ha sido desarrollado el método de determinación de *la microdureza* que se efectúa mediante la penetración de unas puntas pequeñas de diamante con unas cargas no grandes e improntas microscópicas.

2. *Determinación de dureza Brinell.* El ensayo consiste en que se presiona contra la probeta una bola de acero templado con determinado diámetro D (fig. 26). La bola se mantiene algún tiempo bajo la carga P, como resultado de lo cual sobre la superficie se queda una impronta (huella) con diámetro d. La relación de la carga en kilogramos-fuerza respecto al área de la superficie de la impronta, en milímetros cuadrados, se llama número de dureza Brinell,

$$H_B = \frac{P}{F} \text{ [kgf/mm}^2\text{]}.$$

Se puede calcular el área de la superficie de la impronta por la fórmula:

$$F = \frac{\pi}{2} D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right).$$

De esta manera, el número de dureza Brinell es función del diámetro de la impronta d que depende del valor de la carga P y del diámetro D de la bola. La obtención de los resultados com-

parables de los ensayos exige la observación de la ley de semejanza que para el caso dado corresponde a la constancia de la relación de la carga respecto al cuadrado del diámetro de la bola, es decir,

$$\frac{P}{D^2} = \text{const.}$$

Se toma esta relación igual a 30, 10 y 2,5 según la dureza del metal investigado.

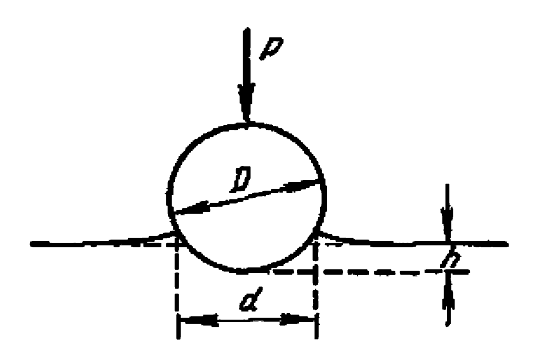


Fig. 26 | Determinación de la dureza por penetración de una bola de acero.

Al ensayar piezas delgadas hay que utilizar una bola de diámetro D menor para evitar la influencia de la superficie del soporte sobre el cual se coloca la probeta. Para determinar correctamente el tiempo de exposición de la probeta a la carga, los valores de la carga y el diámetro de la bola para un material dado,

Tabla 12

Material	Intervalo de valores de H_B, kgf/mm²	Espesor de la probeta, mm	$\frac{P}{D^2}$ kgf/mm²	Diámetro de la bola D, mm	Carga P, kgf	Exposición bajo carga s
Metales ferrosos	140—450	De 6 a 4 ... De 4 a 2 ... Menos de 2 ...	30	10 5 2,5	1000 750 187,5	10
	hasta 140	Más de 6 ... De 6 a 3 ... Menos de 3 ...	10	10 5 2,5	1000 250 62,5	30
Metales no ferrosos	35—130	Más de 6 ... De 6 a 3 ... Menos de 3 ...	10	10 5 2,5	1000 250 62,5	30
	8—35	Más de 6 ... De 6 a 3 ... Menos de 3 ...	2,5	10 5 2,5	250 62,5 15,6	60

es necesario utilizar las recomendaciones del GOST 9012-59 (tabla 12).

La denominación del número de dureza va acompañada muchas veces por un índice que señala las condiciones con las cuales ha sido determinada la dureza. Por ejemplo, el número de dureza Brinell, obtenido mediante la penetración de una bola de diámetro $D = 10$ mm con la carga $P = 3000$ kgf y una exposición de 30 s se escribe en la forma $H_{10/3000/30}$.

El centro de la impronta debe estar a una distancia no menor del diámetro de la bola respecto al borde de la probeta, y la distancia del centro de la impronta vecina debe ser no menor de $2D$.

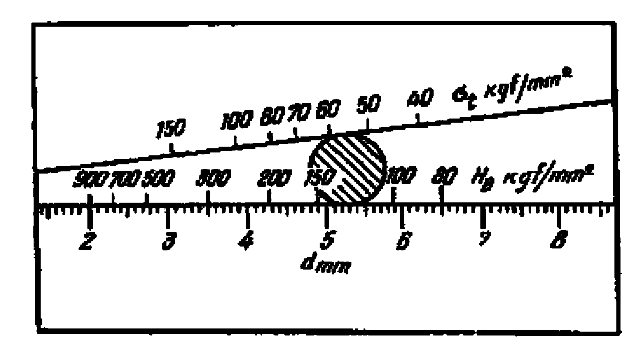


Fig. 27 | Placa para la medición del diámetro de la impronta.

Una vez obtenida la primera impronta, la probeta se desplaza y con las mismas condiciones se obtienen una o dos improntas más.

El diámetro de la impronta d se mide por dos direcciones mutuamente perpendiculares, y de estas mediciones se toma el valor medio. La medición se efectúa mediante un dispositivo especial o con microscopio. Uno de estos dispositivos es una placa transparente con líneas no paralelas, trazados sobre ella, que tienen divisiones que determinan el diámetro d de la impronta y, a veces, para ciertas condiciones de ensayo, los números de dureza H_B y hasta la resistencia provisional σ_t (fig. 27). Poniendo la placa sobre la huella de tal manera que las líneas toquen su contorno, obtenemos en el punto de contacto el diámetro de la impronta en milímetros y, para algunos casos, directamente el número de dureza y la resistencia provisional. Dicho dispositivo brinda la posibilidad de medir rápidamente el diámetro de la impronta con exactitud de hasta 0,1 mm. Una medición más exacta se efectúa con lupa o microscopio por medio de escalas trazadas sobre el ocular. En general, tienen un aumento de 10 a 50. La medición con microscopio logra una exactitud de 0,01 mm.

Tabla 13

Diámetro de la impronta d_{in}, mm	Área de la superficie de la impronta F, mm²	Número de dureza Brinell H_B, kgf/mm²	Diámetro de la impronta d_{in}, mm	Área de la superficie de la impronta F, mm²	Número de dureza Brinell H_B, kgf/mm²
1,55	1,8975	1582	3,50	9,9369	302
1,60	2,0232	1487	3,55	10,2353	298
1,65	2,1866	1373	3,60	10,5338	285
1,70	2,2871	1310	3,65	10,8416	277
1,75	2,4378	1236	3,70	11,1495	269
1,80	2,5761	1164	3,75	11,4495	262
1,85	2,7112	1108	3,80	11,7496	255
1,90	2,8620	1048	3,85	12,0951	248
1,95	3,0159	995	3,90	12,4407	241
2,00	3,1762	945	3,95	12,7785	235
2,05	3,3427	898	4,00	13,1162	229
2,10	3,5290	857	4,05	13,4712	223
2,15	3,6757	817	4,10	13,8262	217
2,20	3,8485	780	4,15	14,1749	212
2,25	4,0275	745	4,20	14,5236	207
2,30	4,2097	712	4,25	14,8943	201
2,35	4,3982	682	4,30	15,2650	197
2,40	4,5930	653	4,35	15,6451	192
2,45	4,7885	627	4,40	16,0253	187
2,50	4,9889	601	4,45	16,4148	183
2,55	5,1931	578	4,50	16,8044	179
2,60	5,4036	555	4,55	17,2065	174
2,65	5,6188	534	4,60	17,6087	170
2,70	5,8340	514	4,65	18,0186	167
2,75	6,0586	495	4,70	18,4286	163
2,80	6,2832	477	4,75	18,8527	159
2,85	6,5172	461	4,80	19,2768	156
2,90	6,7513	444	4,85	19,7135	152
2,95	6,9696	429	4,90	20,1502	149
3,00	7,1880	415	4,95	20,5978	146
3,05	7,4629	401	5,00	21,0455	143
3,10	7,7378	388	5,05	21,5041	140
3,15	8,0001	375	5,10	21,9629	137
3,20	8,2524	363	5,15	22,4357	134
3,25	8,5310	352	5,20	22,9085	131
3,30	8,7996	341	5,25	23,3939	128
3,35	9,0792	331	5,30	23,8793	126
3,40	9,3588	321	5,35	24,3694	123
3,45	9,6478	311	5,40	24,8720	121

Continuación de la tabla 13

Diámetro de la impronta d_{10}, mm	Area de la superficie de la impronta F, mm²	Número de dureza Brinell H_B, kgf/mm²	Diámetro de la impronta d_{10}, mm	Area de la superficie de la impronta F, mm²	Número de dureza Brinell H_B, kgf/mm²
5,45	25,3778	118	6,75	41,1832	72,8
5,50	25,8981	116	6,80	41,9058	71,6
5,55	26,4114	114	6,85	42,6409	70,4
5,60	26,9392	111	6,90	43,3855	69,2
5,65	27,4733	109	6,95	44,1394	68,0
5,70	28,0168	107	7,00	44,9028	66,9
5,75	28,5634	105	7,05	45,6877	65,7
5,80	29,1163	103	7,10	46,4642	64,6
5,85	29,6818	101	7,15	47,2622	63,5
5,90	30,2536	99,2	7,20	48,0696	62,4
5,95	30,8616	97,3	7,25	48,8895	61,4
6,00	31,4160	95,5	7,30	49,7221	60,4
6,05	32,0066	93,7	7,35	50,5703	59,4
6,10	32,6098	92,0	7,40	51,4279	58,4
6,15	32,2136	90,3	7,45	52,2982	57,4
6,20	33,8350	88,7	7,50	53,1810	56,4
6,25	34,4602	87,1	7,55	54,0795	55,5
6,30	35,0634	85,5	7,60	54,9905	54,6
6,35	35,7325	84,0	7,65	55,9173	53,7
6,40	36,3823	82,5	7,70	56,8567	52,8
6,45	37,0426	81,0	7,75	57,7332	51,9
6,50	37,7086	79,6	7,80	58,7824	51,0
6,55	38,3872	78,2	7,85	59,8192	50,2
6,60	36,0720	76,8	7,90	60,7742	49,4
6,65	39,8632	75,4	7,95	61,7931	48,6
6,70	40,4700	74,1	8,00	62,8320	47,8

Para determinar rápidamente los números de dureza según la impronta medida, se emplean tablas especiales elaboradas para distintas condiciones de ensayos. En la tabla 13 aparecen los números de dureza H_B durante el ensayo con la bola de diámetro $D = 10$ mm bajo la carga de $P = 30D^2$ en dependencia del valor medio del diámetro d_{10} de la impronta. Se puede usar la tabla 13 durante los ensayos con bolas de otros diámetros D_1, bajo otra carga P_1, reduciéndolos a los valores de la tabla. Para esto el diámetro d_1 de la impronta, medido en milímetros, se multiplica por la relación $10/D_1$ y según el valor de $d = 10d_1/D_1$ se encuentran H_B en la tabla 13 con la carga $P = 30D_1^2$. Si el ensayo se realiza con otra carga P_1, hay que multiplicar el valor tabular

de H_B por $P_1/30D_1^2$ para obtener el número de dureza de la probeta.

Por ejemplo, durante el ensayo con la bola de diámetro $D_1 = 5$ mm de la carga $P_1 = 2{,}5D_1^2 = 62{,}5$ kgf se obtuvo una impronta con diámetro $d_1 = 1{,}5$ mm. Primeramente calculamos $d_{10} = 10d_1/D_1 = 10 \cdot 1{,}5/5 = 3{,}00$ mm que en tabla 13 corresponde a $H_{B\ 750} = 415$ kgf/mm² para la carga $P = 30D_1^2 = 750$ kgf. Luego para la carga $P_1 = 2{,}5D^2$ obtenemos el número de dureza del material de la probeta,

$$H_B = 415 \frac{2{,}5D_1^2}{30D_1^2} = \frac{415}{12} = 34{,}6 \text{ kgf/mm}^2.$$

Los resultados de los ensayos se anotan según la forma expuesta en la tabla 14.

Tabla 14

№ de la impronta	Primera medición d, mm	Segunda medición d, mm	Valor medio d, mm	Número de dureza Brinell H_B, kgf/mm²

Valiéndose del número de dureza Brinell se puede, sin destruir la probeta, obtener el valor aproximado de la resistencia provisional de algunos aceros, porque para esto existen relaciones simples, a saber: para el acero al cromo-níquel (o para $H_B > 125$) $\sigma_p = 0{,}34\ H_B$; para el acero al carbono (o para $H_B > 175$) $\sigma_p = 0{,}36 H_B$.

Sin embargo, el método de Brinell tiene una serie de insuficiencias. Con este método no se puede ensayar probetas, si su dureza se aproxima a la dureza de la bola, porque ésta sufre deformaciones de consideración que alteran los resultados del ensayo. Si se utilizan bolas corrientes de acero, este hecho limita la prueba de Brinell con la dureza máxima $H_B \approx 400 \div 500$ kgf/mm². A causa de la gran profundidad de la impronta es imposible determinar la dureza de la capa superficial especialmente tratada, porque la bola penetra a través de esta capa a la parte interior más blanda. La medición del diámetro de la impronta requiere relativamente mucho tiempo y, a veces, no es exacta a causa de que el metal, desalojado por la bola, se acumula cerca de los bordes de la impronta. Por eso surgió la necesidad de hallar otros métodos de determinación de la dureza.

3. Determinación de la dureza Rockwell. La esencia del método consiste en utilizar una punta especial de diamante en forma de cono con un ángulo en el vértice de 120° (fig. 28) o una bola que se presionan en el metal con cargas consecutivas (una preliminar $P_0 = 10$ kgf y otra general P, formada de la preliminar y la principal P_g).

Durante la acción de la carga preliminar de 10 kgf la punta penetra en el metal a una profundidad h_0 (fig. 28, *a*); al añadir la carga principal hasta el valor $P = P_0 + P_g$, la profundidad de la impronta aumenta (fig. 28, *b*) y después de quitar la carga principal, queda igual a h_1 (fig. 28, *c*).

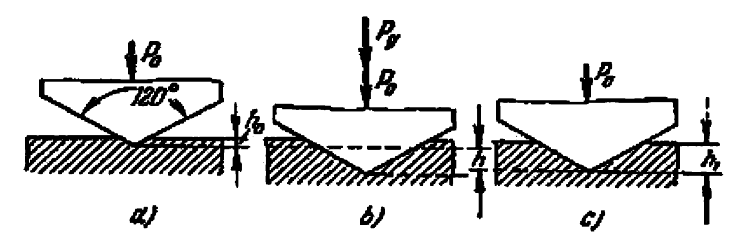


Fig. 28 | Determinación de la dureza Rockwell: *a*, penetración del cono con carga preliminar: *b*, lo mismo, agregando la carga principal; *c*, después de quitar la carga principal.

La profundidad de la impronta obtenida debido a la carga principal P_g e igual a $h = h_1 - h_0$, caracteriza la dureza Rockwell. Mientras mayor es la profundidad h de la impronta, menor es la dureza. Entre el número de dureza Rockwell y la profundidad h existe la siguiente dependencia:

para el cono de diamante $H_{RC} = 100 - \frac{h}{0{,}002}$,

para la bola de acero $H_{RB} = 130 - \frac{h}{0{,}002}$.

La profundidad de la impronta se mide por medio del indicador (fig. 29), sobre el cual están situadas dos escalas B y C de los números de dureza Rockwell con el mismo valor de una división correspondiente a una profundidad de 0,002 mm de la impronta.

La escala B (roja) se emplea para bolas de acero. La más utilizada es la bola con diámetro $d = 1{,}59$ mm, es decir, 1/16″ con una carga general $P = 100$ kgf. La escala roja sirve para ensayar materiales con dureza media y pequeña que en este caso se representa por H_{RB}. Si la dureza $H_{RB} < 30$, los resultados del ensayo son inexactos a causa de la gran deformación del material. Entonces es necesario utilizar una bola de diámetro mayor

con otra carga general P. Si la dureza $H_{RB} \geqslant 100$, es preciso utilizar la punta de diamante ya que es posible el aplastamiento de la bola.

Para hacer más cómoda la medida de la profundidad de la impronta hecha con bola, la lectura comienza desde de cifra $B30$, la cual se hace coincidir con la aguja girando la esfera cuando la carga inicial $P_0 = 10$ kgf. Dicho desplazamiento está determinado por el hecho de que la profundidad de la impronta de la bola no

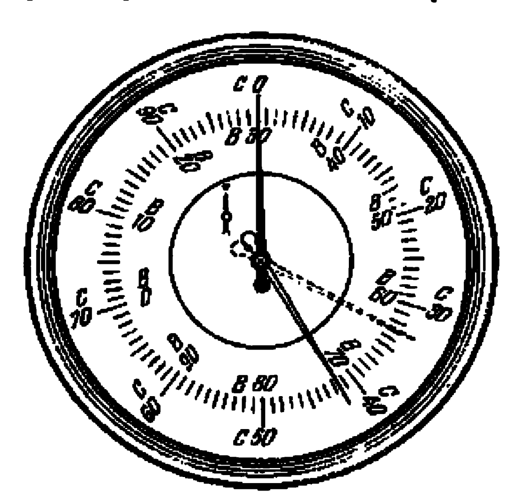


Fig. 29 | Indicador para medir la profundidad de la lectura con los números de dureza Rockwell: la escala B para la bola con $d = 1{,}59$ mm (1/16"), la carga de 100 kgf; la escala C para el diamante, la carga de 150 kgf.

suele ser menor que 0,06 mm ni sobrepasar 0,26 mm, lo que corresponde al intervalo de 30 a 130 divisiones con un valor de 0,002 mm. Con la posición desplazada de la esfera, los números de dureza se hallan en la escala B entre los límites de 100 a 30.

La escala C (negra) sirve para determinar la dureza con un cono de diamante independientemente del valor de la carga general. Para la carga general $P = 150$ kgf la dureza se representa por H_{RC}. Para materiales relativamente blandos que tienen $H_{RC} \leqslant 20$, se utiliza la bola de acero, porque la punta de diamante deja una impronta demasiado profunda. Cuando $H_{RC} \geqslant 70$, tiene lugar una presión grande sobre el diamante, y este puede quebrarse. Por eso, para los materiales duros y las probetas delgadas se toma la carga general sobre el diamante igual a $P = 60$ kgf, y en estos casos la dureza se escribe H_{RA}. La lectura siempre se efectúa en la escala C a partir de cero. La carga preliminar en todos los casos queda igual a 10 kgf.

De esta manera, el número de dureza Rockwell es una magnitud convencional abstracta que depende de la profundidad de la impronta formada por distintas puntas con distinta carga.

Tanto la carga como la punta se eligen según el GOST 9013-69 en la tabla 15.

Tabla 15

Dureza aproximada Brinell H_B, kgf/mm²	Denominación de la escala	Tipo de la punta	Carga general P, kgf	Denominación de dureza Rockwell	Límites admisibles de la escala
60—230	*B*	Bola de acero	100	H_{RB}	25—100
230—700	*C*	Cono de diamante	150	H_{RC}	20—67
Más de 700	*A*	Cono de diamante	60	H_{RA}	Más de 70

La determinación de la dureza Rockwell se efectúa en el siguiente orden: una vez elegidas la punta y la carga, la probeta preparada se sitúa en el soporte del instrumento y se le aplica la liminar $P_0 = 10$ kgf. La esfera del indicador se mueve hasta coinhasta coincidir las divisiones *CO* y *B*30 con la aguja (posición de la aguja negra en la fig. 29). Luego se aumenta la carga hasta $P = P_0 + P_g$. La aguja del indicador gira en dirección contraria a las agujas del reloj (por ejemplo, ocupa la posición mostrada con la línea punteada en la fig. 29). Mantentendo la carga principal durante 4—8 s, se quita la carga principal P_g, dejando la preliminar, después de lo cual la aguja se desplaza un poco hacia atrás (en la posición de la aguja blanca en la fig. 29) e indica el número de dureza Rockwell; por ejemplo, hay que leer en la fig. 29 $H_{RB} = 71{,}5$ para el ensayo con la bola y $H_{RC} = 41{,}5$, para el diamante. Los resultados obtenidos se anotan en el registro, se quita toda la carga, se pone la probeta en otro lugar y el ensayo se repite dos veces o más para obtener el valor medio más exacto del número de dureza.

Es posible disminuir los errores durante la determinación de dureza Rockwell por medio de un esmerilado meticuloso de la superficie de la parte de trabajo del cono de diamante y conservando con exactitud sus dimensiones. Hay que observar que la superficie de la probeta también sea regular y bien esmerilada, además su espesor debe ser no menor que diez veces la profundidad de la impronta, y la distancia entre los centros de improntas o del borde de la probeta, no menor que $2{,}5 \div 3$ mm para el cono de diamante y no menor que 4 mm para la bola de acero.

El método de Rockwell, en comparación con otros métodos, tiene ventajas esenciales que consisten en la automatización de las operaciones de ensayo, la obtención de los números de dureza directamente en la escala del instrumento y una gran velocidad de los ensayos que requieren solamente unos pocos segundos, teniendo preparada la superficie de la probeta. El uso de la punta de un material más duro da la posibilidad de ensayar metales bastante duros, cosa imposible según el método de Brinell.

4. Determinación de la dureza con pirámide de diamante. La determinación de la dureza con una pirámide de diamante consiste

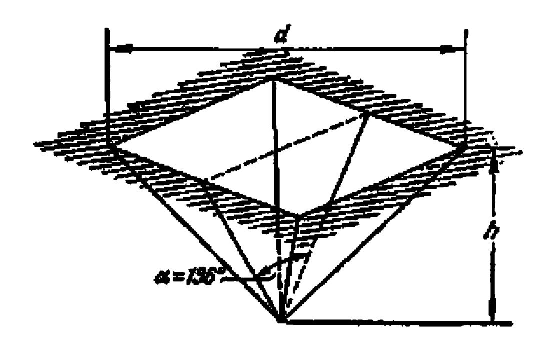


Fig. 30. Impronta piramidal.

en que la pirámide se presiona contra el metal ensayado. La pirámide de diamante tiene una base cuadrada y un ángulo $\alpha = 136°$ entre sus caras opuestas. El número de dureza según este método se toma igual a la relación de la carga P en kilogramos-fuerza respecto al área de la superficie F en milímetros cuadrados de la impronta piramidal (fig. 30), y se expresa con la fórmula

$$H_D = \frac{P}{F} = \frac{2P \operatorname{sen}\frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1.8544\frac{P}{d^2}\ [\mathrm{kgf/mm^2}],$$

donde d es el promedio aritmético de las longitudes de ambas diagonales de la impronta, medidas después de quitar la carga.

La particularidad de este método consiste en que con un material de dureza uniforme todas las improntas para cualquier carga resultan semejantes, el área de su superficie es proporcional al cuadrado de la diagonal d de la impronta y para todas las cargas los números de dureza son iguales. Según el GOST 2999-59 se recomienda utilizar para el ensayo uno de los siguientes valores de la carga: 5; 10; 20; 30; 50; 100 y 120 kgf. Cuanto más grande sea la carga, más exacto será el resultado del ensayo al obtenerse una impronta grande. Sin embargo, hay que observar que el espesor de la probeta sea mayor que diez veces la profundidad h de la impronta o mayor que 1,5d, porque cuando $\alpha = 136°$, la

relación $h/d \approx 1/7$. Cuanto más delgada es la probeta, menor es la carga para ensayar probetas delgadas y la capa fina superficial. El espesor mínimo admisible es aproximadamente 0,3 mm con una carga de 5 kgf para acero templado. No se recomienda utilizar cargas mayores de 50 kgf para los materiales duros con el objeto de evitar el deterioro del diamante.

Se puede fijar la carga para determinar la dureza con la pirámide según la tabla 16 en dependencia del espesor de la probeta y la dureza esperada.

Tabla 16

Espesor de la probeta, mm	Carga, kgf			
	para H_D = = 25—50 kgf/cm²	para H_D = = 50—100 kgf/cm²	para H_D = = 100—300 kgf/cm²	para H_D = = 300—900 kgf/cm²
0,3—0,5	—	—	—	5—10
0,5—1,0	—	—	5—10	10—20
1—2	5—10	5—10	10—20	20 y más
2—4	10—20	10—30	20—50	hasta 120
4 y más	20 y más	30 y más	50 y más	hasta 120

Las exigencias de la limpieza tanto de la probeta, como de la punta y las condiciones de ubicación de las improntas, planteadas durante los ensayos Brinell y Rockwell, se mantienen también para los ensayos de dureza con la pirámide. La exposición bajo la carga se hace automáticamente y se regula en el aparato de ensayo. Las diagonales de la impronta piramidal se miden con microscopio, que es una parte indispensable del instrumento. El número de dureza se halla por el valor medio de las diagonales en las tablas, suministradas normalmente con el aparato. Los resultados se anotan en el registro de acuerdo con la tabla 14.

El número de dureza va acompañado por un índice que señala la carga con que ha sido realizado el ensayo. Por ejemplo, H_{D30} denota la dureza con la pirámide bajo la carga de 30 kgf. Aunque H_D no depende de la carga, ésta se señala para poder juzgar sobre la profundidad de la impronta.

La utilización de la pirámide de diamante tiene las siguientes ventajas:

1) las improntas resultan bien perfiladas, cómodas para la medición;

2) la forma de las improntas es geométricamente semejante, por lo cual la dureza para un mismo material es constante, independientemente de la magnitud de la carga;

3) la dureza con la pirámide coincide exactamente con la dureza Brinell para los materiales de dureza media, durante cuyo

ensayo la bola de acero todavía no empieza a deformarse, lo que indica la gran seguridad de los resultados en los ensayos con pirámide;

4) este método es aplicable con igual éxito para los materiales blandos y duros y, sobre todo, para los ensayos de las probetas delgadas y las capas superficiales.

5. Determinación de la dureza Shore. Por medida de dureza Shore se toma el valor de la energía elástica del rebote de un martillo que se deja caer sobre la probeta. Una parte de la energía cinética del martillo en el momento del impacto se gasta para la formación de la impronta a consecuencia de la deformación plástica, y la otra se gasta para la deformación elástica del material bajo el martillo. La energía de la deformación elástica hace rebotar el martillo de la probeta después del impacto. Resulta que cuanto más duro es el material ensayado, menor es su deformación plástica, pero mayor cantidad de energía cinética se gasta para la deformación elástica del material y mayor es la altura a que llega el martillo al rebotar. Además, la altura de rebote depende del material del martillo, su peso y la altura de la caída.

Para determinar la dureza Schore se utiliza un martillo estándar en forma de cilindro con la punta de diamante cónica un poco redondeada. El martillo cae de una altura estándar. La altura de rebote del martillo, medida en unidades convencionales, es el número de dureza Shore y se denota por H_S. Por 100 unidades convencionales se toma la altura de rebote del martillo desde el acero de alto carbono para herramientas, templado hasta martensita. En otras palabras, la dureza del acero para herramientas, igual a $H_S = 100$, sirve de patrón de dureza Shore.

También sobre el valor del rebote del martillo influye esencialmente el módulo de elasticidad, del cual depende la energía de la deformación elástica. Algunos materiales que tienen un bajo módulo de elasticidad originan un rebote comparativamente grande a consecuencia de un valor también relativamente grande del trabajo de la deformación elástica. Por ejemplo, el caucho y el cristal ocasionan un rebote más grande que el acero templado y resultan más duros según el método de Shore, lo que no concuerda con las nociones comunes sobre la dureza. Por eso el método de rebote elástico permite comparar la dureza de los materiales sólo con módulos de elasticidad iguales o próximos, que tienen aproximadamente igual capacidad de deformación elástica. Este método no es aplicable en principio para comparar los materiales con módulos de elasticidad muy diferentes. Hablando en rigor, este método no sólo determina la dureza, sino que caracteriza también las propiedades elásticas del material.

En los aparatos modernos, para determinar la dureza Shore, la altura de rebote del martillo, es decir, el número de dureza,

se fija automáticamente (en el indicador). Por eso se logra realizar un gran número de ensayos en un lapso corto, que es una ventaja grande de dicho método.

Durante el ensayo no se permite hacer más de un martillazo en el mismo lugar de la pieza o la probeta ensayadas porque a causa del endurecimiento del metal por deformación en frío con los golpes repetidos los números de dureza resultan más elevados. Comúnmente, el ensayo se realiza por lo menos en cinco puntos de la superficie de la pieza. El promedio aritmético de estos cinco valores se toma por la dureza buscada, si la diferencia entre las indicaciones máxima y mínima no sobrepasa cinco unidades.

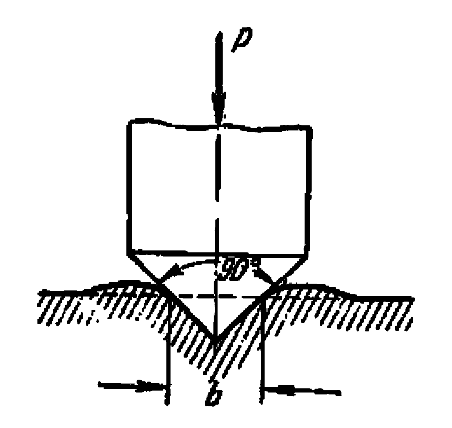


Fig. 31 | Cono de diamante para el rayado

Para realizar el ensayo, hay que instalar el aparato en posición exacta vertical, lo que se logra mediante el nivel que éste posee. Tanto la superficie de la pieza ensayada como la del banco de ensayo deben estar impecablemente limpios. El espesor de la pieza debe ser no menor que 2 mm.

6. Determinación de la dureza por rayado. La esencia del método consiste en rayar la superficie con un cono de diamante que, en general, tiene un ángulo en la punta de 90° (fig. 31). Por la dureza de rayado se toma el valor de la carga P_{10} en gramos-fuerza que provoca la raya con un ancho constante $b = 10\,\mu$ o más frecuentemente la cantidad recíproca al ancho de las rayas b_{50} en milímetros con carga constante $P = 50$ gf, es decir,

$$H_r = \frac{1}{b_{50}}.$$

El rayado se realiza sobre la probeta en direcciones longitudinal y transversal con un aparato especial (véase el § 27, pág. 266). El ancho de la raya se mide con un microscopio al nivel de la superficie original de la probeta sin tener en cuenta las acumulaciones del material. Los bordes del rayado no resultan

lo suficientemente perfilados, por eso para obtener resultados más exactos hay que realizar y medir un gran número de rayas, a veces varias decenas en la misma probeta. Por eso la velocidad de dichos ensayos es extremadamente pequeña.

Este método tiene la particularidad de que la dureza medida mediante el rayado se mantiene constante durante todas las mediciones del grado de endurecimiento por deformación en frío del material ensayado, lo que diferencia ostensiblemente dicho método de los demás, cuyos resultados dependen del endurecimiento por deformación en frío. Además, se observa un vínculo estrecho del número de dureza H_r con la resistencia a la tracción.

7. Microdureza. En no pocos casos es necesario conocer la dureza del material y de sus componentes estructurales en unos volúmenes muy pequeños, microscópicos, la llamada microdureza. La microdureza por lo común se determina con el método de penetración y en calidad de la punta se emplea una pirámide de diamante de cuatro caras con base cuadrada (ángulo de vértice $\alpha = 136°$). En otras palabras, se utiliza el mismo método que para la determinación de la dureza promedia corriente (macroscópica) usando una punta más perfecta. Para determinar la microdureza se necesita un grado alto de precisión y de calidad en la fabricación de la pirámide, sobre todo cerca de su vértice, y un esmerilado bastante perfecto de las caras. La determinación de la microdureza sólo es posible mediante aparatos especiales dotados de microscopio con un ocular micrométrico y mecanismos para cargar y fijar correctamenta la punta.

El número de microdureza H_μ al aplicar la pirámide de cuatro caras se calcula por el valor promedio de las longitudes d de diagonales de la impronta, igual que el número H_D que le corresponde, a saber:

$$H_\mu = 1{,}8544 \frac{P}{d^2} \text{ [kgf/mm}^2\text{]}.$$

Todavía no existe el estándar para el valor de la carga P sobre la pirámide; en la práctica para determinar la microdureza se utilizan cargas de 1 a 200 gf.

Para obtener resultados seguros, es necesario medir las diagonales de unas cuantas improntas y observar que el espesor de la pieza, del grano o de la cristalita sea no menor que diez veces el espesor de la impronta. La distancia entre los centros de las improntas o del borde del grano debe ser no menor que $2d$. La superficie de la impronta debe ser pulida y es deseable utilizar no el pulido mecánico, sino el electrolítico que no da una capa endurecida por deformación en frío.

La estructura de la mayoría de las aleaciones está formada por elementos que tienen propiedades diferentes. A diferencia de

Tabla 17

Números de dureza						Números de dureza					
Brinell H_B	Rockwell H_R para la escala			con pirámide H_D	Shore H_S	Brinell H_B	Rockwell H_R para la escala			con pirámide H_D	Shore H_S
	A	C	B				A	C	B		
780	84	72	—	1224	107	229	61	20	100	228	33
745	83	70	—	1116	100	223	60	19	99	222	33
712	82	68	—	1022	96	217	60	17	98	217	32
682	81	66	—	941	92	212	59	15	97	213	31
653	80	64	—	868	88	207	59	14	95	208	30
627	79	62	—	804	85	201	58	13	94	201	30
601	78	60	—	746	81	197	58	12	93	197	29
578	78	58	—	694	78	192	57	11	92	192	29
555	77	56	—	650	75	187	57	9	91	186	28
534	76	54	—	606	72	183	56	8	90	183	28
514	75	52	—	587	70	179	56	7	90	178	27
496	74	50	—	551	68	174	55	6	89	174	27
477	74	49	—	534	66	170	55	4	88	171	26
461	73	48	—	502	64	167	54	3	87	166	26
444	73	46	—	474	61	163	53	2	86	162	25
429	72	45	—	460	59	159	53	1	85	159	25
415	72	43	—	435	57	156	52	0	84	155	24
401	71	42	—	423	55	152	—	—	83	152	24
388	71	41	—	401	53	149	—	—	82	149	23
375	70	40	—	390	52	146	—	—	81	146	23
363	70	39	—	380	50	143	—	—	80	143	22
352	69	38	—	361	49	140	—	—	79	140	22
341	68	36	—	341	47	137	—	—	78	138	21
331	67	35	—	333	46	134	—	—	77	134	21
321	67	33	—	320	45	131	—	—	76	131	20
311	66	32	—	311	44	128	—	—	75	129	20
302	66	31	—	303	42	126	—	—	74	127	20
293	65	30	—	292	41	123	—	—	73	123	19
285	65	29	—	285	40	121	—	—	72	121	19
277	64	28	—	278	39	118	—	—	71	118	19
269	64	27	—	270	38	116	—	—	70	116	18
262	63	26	—	261	37	114	—	—	68	115	18
255	63	25	—	255	36	111	—	—	67	113	18
248	62	24	—	249	36	109	—	—	66	110	17
241	62	23	102	240	35	107	—	—	65	109	17
235	61	21	101	235	34	105	—	—	64	107	17

la macrodureza que refleja las propiedades medias de todo un conglomerado de distintos granos, el conocimiento de la microdureza permite estudiar y comparar las componentes aisladas de las aleaciones por su dureza y aclarar la distribución de la dureza dentro de un grano o una cristalita. Con todo esto el grano estudiado se examina como una probeta independiente impregnada en el material que la rodea. Además, la medición de la microdureza ofrece resultados importantes para el estudio de las propiedades de finas capas superficiales lo que permite, por ejemplo, evaluar la profundidad de la zona endurecida luego de trabajar la superficie con diferentes métodos (torneado con cuchilla, taladrado, chorreado con granalla, pulido, etc.). Cuando se conoce la microdureza, es posible llevar el control sobre piezas bastante pequeñas de diferentes aparatos y mecanismos de precisión, por ejemplo, mecanismos de relojería, al igual que se hizo posible determinar la distribución de las deformaciones en el cuerpo de la pieza, por ejemplo, después del prensado en frío.

8. Comparación de los números de dureza. El caracter convencional de los métodos de determinación de la dureza impide dar un método general para hallar los números de dureza de distintos materiales. Por lo común, se hacen diferentes tablas o nomogramas de correlación de los números de dureza que tienen un carácter empírico y son aptos para los materiales homogéneos, principalmente para aceros de igual composición química. A base de estas tablas se pueden comparar los números de dureza deter-

Tabla 18

Número de orden del ensayo y denominación del valor determinado	números de dureza					
	con pirámide				Rockwell H_R	Shore H_S
	1-ra diagonal, mm	2-a diagonal, mm	valor medio d, mm	H_D		
1er ensayo 2° ensayo 3er ensayo						
Número medio de dureza						
Reducido a H_B						
Resistencia provisional σ_p						

minados por diferentes métodos. Habitualmente, todos los índices de dureza del material se reducen a la dureza Brinell, para después determinar aproximadamente la resistencia provisional del material valiéndose de la dependencia conocida $\sigma_b = (0,30 \div 0,36)\ H_B$.

En la tabla 17 se presentan las relaciones de los números de dureza Brinell H_B, dureza Rockwell H_R, dureza de la pirámide H_D y dureza Shore H_S.

Los resultados de los ensayos de dureza con la utilización de las correlaciones de la tabla 17 se presentan de acuerdo a la forma que aparece en la tabla 18.

EXPERIMENTO 8. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO

1. Datos generales. El propósito del trabajo consiste en conocer en uno de los ejemplos el fenómeno del escurrimiento y construir su curva para una probeta dada de acero con determinadas temperatura y fuerza de tracción constantes.

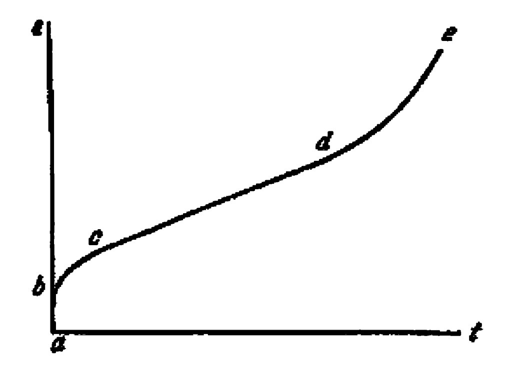


Fig. 32 Curva primaria del escurrimiento. En la etapa de escurrimiento establecido (cd) el alargamiento ε depende linealmente del tiempo t.

La curva de escurrimiento es un diagrama que representa la dependencia entre el alargamiento de la probeta y el tiempo de acción de la fuerza. En el eje de las abscisas se coloca el tiempo (fig. 32) contado desde el inicio del ensayo, y en el eje de las ordenadas, el alargamiento relativo de la probeta. La curva de escurrimiento tiene cuatro tramos: 1) la recta vertical ab de deformación de la probeta en el momento de carga; 2) el tramo bc de escurrimiento no estacionario que es la primera etapa del escurrimiento; 3) el tramo rectilíneo cd de escurrimiento estacionario, la segunda etapa; 4) el tramo de de escurrimiento acelerado luego de aparecer un cuello sobre la probeta, la tercera etapa.

El ángulo de inclinación de la tangente a la curva de escurrimiento caracteriza la velocidad de deformación de la probeta en un momento dado. La velocidad de deformación en la segunda

etapa del escurrimiento es constante. La magnitud de dicha velocidad determina el plazo de funcionamiento de la pieza y es muy importante para muchos casos de la práctica. La tensión correspondiente en la probeta se llama límite de escurrimiento con la velocidad de deformación y temperatura dadas.

Por lo general se necesita determinar el valor del límite de escurrimiento para una velocidad de deformación establecida con una temperatura determinada. Para esto se tienen que obtener unas cuantas curvas de escurrimiento con la temperatura dada que corresponden a distintas cargas; después se puede construir una curva de velocidad de deformación en la segunda etapa del escurrimiento en función de la tensión de tracción correspondiente (límite de escurrimiento).

Habitualmente la construcción de las curvas de escurrimiento es resultado de los ensayos con una duración del orden de varias horas y hasta días. La duración del ensayo depende de la temperatura y la magnitud de la carga. El escurrimiento del acero prácticamente no se observa a temperatura corriente. Pero a altas temperaturas el escurrimiento puede ser bastante grande.

Prácticamente se tienen que utilizar tales regímenes de ensayo y probetas que el ensayo pueda realizarse en una hora y media o dos horas. En el caso del acero Cт. 3 a una temperatura de 450—500° y una presión de 2000—2500 kgf/cm² la duración del ensayo es de una hora y media o dos horas. La segunda etapa del escurrimiento presenta el mayor interés, por eso no es obligatorio llevar la probeta hasta su destrucción. Basta con asegurar que llegue la segunda etapa de escurrimiento y determinar con esto la respectiva velocidad de deformación.

Se han establecido dos tipos de probetas utilizadas para el ensayo de escurrimiento: 1) normal con un diámetro de 1 cm, longitud de cálculo 10 cm y 2) alargada con un diámetro de 1 cm, longitud de 20 cm. La forma de las cabezas de la probeta depende de la construcción de los mandriles de la máquina.

2. Realización del ensayo. El ensayo se efectúa en una máquina que tiene algún dispositivo de calentamiento (véase, por ejemplo, la descripción de la máquina en el § 33).

Previamente la probeta se mantiene durante una hora a la temperatura determinada. Luego, suavemente, se somete la probeta a la carga previa, igual a un 10% aproximadamente de la carga total dada. La tensión en la probeta bajo la carga previa no debe sobrepasar 50—100 kgf/cm². Una vez hecho esto se conecta un aparato destinado a medir los alargamientos, luego de lo cual la probeta permanece aún durante 5 minutos bajo la carga previa. Entonces se toma la lectura en el aparato asegurándose de que ésta no ha cambiado.

Luego se aplica suavemente la carga total y se vuelve a tomar la lectura en el aparato. Después se toman las lecturas en lapsos iguales de 2 ó 3 minutos. Una vez terminado el ensayo, si la probeta no se ha destruido, se descarga la probeta hasta una carga igual a la previa y se anota la magnitud de la deformación permanente de la probeta.

Tabla 19

Temperatura . . . . Tensión . . . .

Tiempo, min	Lectura en el medidor de alargamientos

La forma del registro durante el ensayo se presenta en la tabla 19. La primera columna de esta tabla, el tiempo, debe llenarse con antelación.

CAPÍTULO II

Estudio de las deformaciones y las tensiones

EXPERIMENTO 9. TRACCION EXCENTRICA

1. Datos generales. Si las fuerzas de tracción están dirigidas a lo largo del eje de la barra, surge la tracción central o axial. Este caso se examinó en los experimentos 1 y 2. Pero si la línea de acción de las fuerzas de tracción está desviada del eje de la barra a cierta distancia e (fig. 33), dicha tracción se llama excéntrica; la distancia e se llama excentricidad de la fuerza de tracción P. Por lo general el experimento de tracción excéntrica se realiza sobre una banda de acero de sección constante.

El propósito del ensayo consiste en convencerse, en un ejemplo claro, de que las tensiones no se distribuyen de una manera uniforme por la sección de una barra cargada excéntricamente, en determinar experimentalmente la ley de distribución de las tensiones y compararla con la teórica.

Si se carga una banda de acero, puesta excéntricamente en la máquina, hay que medir con extensómetros los alargamientos longitudinales, calcular las tensiones normales por la sección de la banda y construir el gráfico de tensiones.

2. Preparación y realización del ensayo. El ensayo se efectúa en alguna de las máquinas de romper. La potencia de la máquina se determina por la resistencia de la probeta.

Las dimensiones de la probeta a ensayar deben ser suficientes para instalar unos cuantos extensómetros (no menos de 3) por el ancho de la probeta. En la fig. 33 se muestran cuatro extensómetros. Para hacer más cómoda la construcción del gráfico de tensiones, hay que ubicar los extensómetros a distancias iguales unos de los otros. Para la realización de este trabajo son cómodos los extensómetros eléctricos (véase el experimento 30) o los extensómetros de palanca de Guggenberger (véase la pág. 39). Para simplificar los cálculos deben elegirse extensómetros con igual aumento.

La sujeción de los extensómetros sobre la probeta se realiza con bastante seguridad mediante mordazas acodadas: una mordaza para dos extensómetros. Es posible también el uso de ventosas neumáticas (véase la pág. 40).

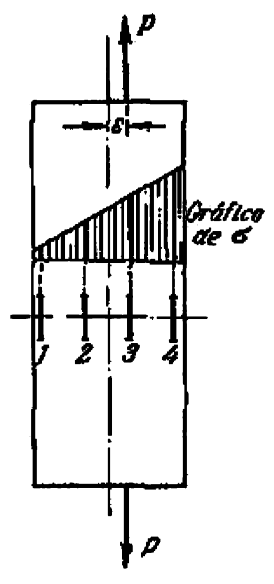
La probeta debe tener longitud suficiente para que se pueda considerar por excluida la influencia del modo de aplicación de

la carga. Si b es el ancho de la probeta, la longitud de ésta entre los puntos de aplicación de la carga será no menor de $l = 4b + s$, donde s es la base del extensómetro.

El registro de las observaciones con extensómetros se hace en la forma que se presenta en la tabla 20.

En la primera columna de la tabla se registran las lecturas de todos los extensómetros con una cierta carga inicial. Luego se inscriben las lecturas de los extensómetros para cada intervalo igual de carga en la segunda columna, tercera, etc.

En caso de la banda con un espesor de 1 cm y un ancho de 6 cm hecha de acero Cт. 3, para la excentricidad de la fuerza de tracción 1 cm, la carga inicial puede ser 500 ó 1000 kgf, mientras el escalón de carga, 1000 kgf, la carga final es igual a 4,5—5,0 tf. Con la carga de 5 tf la tensión máxima



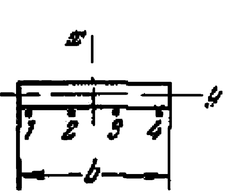


Fig. 33 | Tracción excéntrica de la banda: e, excentricidad de la fuerza de tracción; *1, 2, 3* y *4*, extensómetros. La tensión normal σ lejos de los puntos de aplicación de las fuerzas de tracción se cambia por el ancho de la banda según la ley lineal.

en la probeta es de 1670 kgf/cm² que es menos del límite de proporcionalidad para el acero Cт. 3.

3. Interpretación de los resultados del ensayo. Restando de cada lectura posterior la anterior, calculamos el incremento de las lecturas para cada extensómetro. Dichos incrementos son aproximadamente iguales para cada extensómetro; de ahí sacamos los valores medios de los incrementos.

Los incrementos de las lecturas para cada extensómetro son proporcionales al incremento de la tensión. Par determinar las tensiones, los incrementos de las lecturas se multiplicarán por

$$\beta = \frac{E}{Ks},$$

Tabla 20

Carga P						Incremento medio de la lectura Δn	Aumento del extensómetro K	$\beta=\frac{E}{Ks}$	Incremento de la tensión $\sigma=\beta\Delta n$
Extensómetro № 1	Lectura								
	Incremento de la lectura								
Extensómetro № 2	Lectura								
	Incremento de la lectura								
Extensómetro № 3	Lectura								
	Incremento de la lectura								

donde E es el módulo de elasticidad del material, K es el aumento del extensómetro, s es la base del extensómetro.

La tensión teórica durante la tracción excéntrica se determina por la fórmula (fig. 33),

$$\sigma=\frac{P}{F}\left(1+\frac{e}{i_x^2}\,y\right),$$

donde F es el área de la sección transversal de la banda, $i_x = 0{,}288\,b$ es el radio de inercia de la sección de la banda respecto al eje x, y es la distancia desde el eje x hasta el punto examinado de la sección de la banda.

El gráfico de tensiones σ según la fórmula expuesta es lineal (véase la fig. 33). Las magnitudes experimentales de las tensiones de costumbre se desvían insignificantemente de las teóricas.

EXPERIMENTO 10. TRACCIÓN DE UNA BANDA CON ORIFICIO

1. Datos generales. El propósito del experimento consiste en determinar el carácter de distribución de las tensiones en una banda debilitada por un orificio redondo, y la magnitud del coeficiente de concentración de las tensiones. De la teoría de elastici-

dad y la experiencia es sabido que en la placa con recorte, sometida a la tracción (o compresión), las tensiones cerca del recorte son mucho mayores que en los tramos sin recorte.

En la fig. 34 están representados los gráficos de distribución de las tensiones normales en la sección *CD* de la banda. En la sección *AB* que está bastante alejada del orificio, la distribución de las tensiones es uniforme.

La relación $\sigma_{máx}/\sigma_0$ de la tensión real máxima (cerca del borde del orificio) respecto a la tensión media, para este caso se

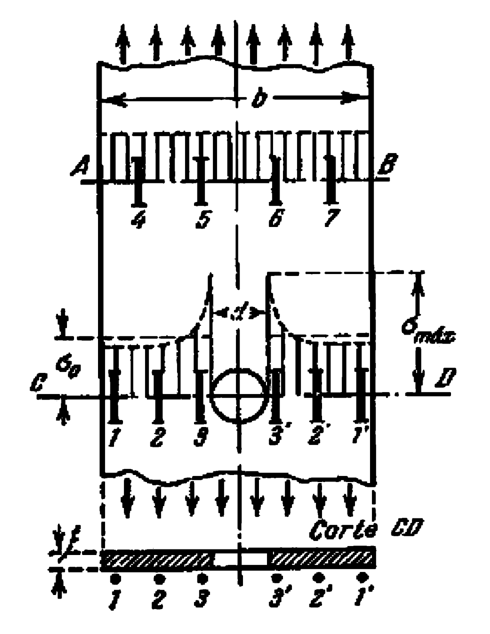


Fig. 34 | Estudio de la placa con orificio. Según las indicaciones de los extensómetros 4—7, las tensiones en la sección *AB* (lejos del recorte) están distribuidas uniformemente: los extensómetros 1—3 y 1'—3' muestran la concentración de las tensiones cerca del orificio.

llama coeficiente α de concentración de las tensiones. En la sección debilitada $\sigma_0 = \frac{P}{t(b-d)}$. Aquí se tiene en cuenta el coeficiente teórico de concentración, porque el fenómeno se examina con las deformaciones elásticas. Teóricamente $\alpha = 3$, si el diámetro d del orificio es bastante pequeño en comparación con el ancho b de la banda. Con el aumento de la relación del diámetro del orificio al ancho de la banda, la magnitud de α disminuye.

Los extensómetros que sirven para medir las deformaciones de la probeta (véase la descripción del extensómetro en la pág. 39), se instalan en la banda de tal manera que puedan medir los alargamientos longitudinales.

Si la variación de la lectura en el extensómetro es igual a Δn y el aumento del extensómetro es K, el alargamiento será $\lambda = \Delta n/K$. Para el estado de tensión uniaxial [1]), si se conoce el

[1]) Consideramos aproximadamente que el estado de tensión es uniaxial.

alargamiento (acortamiento) λ de una fibra con la longitud l, es posible determinar la tensión por medio de la fórmula

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{E}{l}\lambda.$$

En nuestro caso $l = s$, por lo tanto $\sigma = \frac{E}{s}\frac{\Delta n}{K}$.

Los datos obtenidos con los extensómetros *1*, *2*, *3* y *1'*, *2'*, *3'* (fig. 34) permiten construir el gráfico de σ en la sección debilitada *CD*. Los extensómetros *4*, *5*, *6*, *7* se instalan para aclarar la distribución de las tensiones en la sección alejada del recorte.

2. Realización del ensayo e interpretación de los resultados. El experimento se efectúa en máquinas con fuerza de 50 ó 30 tf (la descripción de estas máquinas se da en las págs. 226 y 227). Las probetas (de acero o dural) tienen un ancho de 20—25 cm y un espesor de 1,0 cm o menos. El diámetro del recorte es de 5 cm. Para evitar la influencia de marchas muertas en los extensómetros, la probeta se carga previamente con la fuerza P_1 igual a 1—2 tf. Después de esto se toman en todos los extensómetros lecturas iniciales n_1 que se anotan en el registro de laboratorio según la forma presentada en la tabla 21. Aumentando luego la carga hasta algún valor P_2 (en dependencia de la resistencia de la probeta se toma $P_2 = 10 - 15 - 20$ tf), se vuelven a tomar lecturas (n_2) en los extensómetros.

Posteriormente hay que descargar la probeta hasta un valor de carga un poco menor de P_1 y de nuevo, al llegar a esta carga (desde abajo), repetir las tomas de lecturas en los extensómetros. Estos deben coincidir con las iniciales o tener muy poca diferencia (0,1—0,2 mm).

Los incrementos de las lecturas $\Delta n = n_2 - n_1$ son proporcionales a los incrementos de las tensiones σ, es decir,

$$\sigma = E\varepsilon = E\frac{\Delta s}{s} = E\frac{\Delta n}{Ks} = \beta\,\Delta n, \tag{1}$$

donde $\beta = E/Ks$; aquí K es el aumento de extensómetro. Por ejemplo, $K = 1000$, $E = 2\cdot10^6$ kgf/cm², $\beta = 2\cdot10^6/1000\cdot20 = 100$ kgf/cm² mm y $\sigma = 100\,\Delta n$ kgf/cm², donde Δn se da en milímetros.

Los valores obtenidos de σ brindan la posibilidad de construir el gráfico buscado de distribución de las tensiones normales en la sección debilitada *CD* (fig. 34) de la probeta y determinar el coeficiente de concentración de las tensiones.

El gráfico de las tensiones construido de esta manera no puede ser totalmente simétrico a consecuencia de errores inevitables en la variación de las deformaciones y la carga de la probeta. Más exacto será el gráfico simétrico construido con valores me-

Tabla 21

№ del extensómetro		Lecturas de los extensómetros		Incremento de las lecturas del extensómetro $\Delta n = n_2 - n_1$ mm	Aumento del extensómetro K	Base del extensómetro s	$\beta = \frac{E}{sK}$	Incremento de la tensión $\sigma = \beta \Delta n$, kgf/cm²	Valor medio de σ, kgf/cm²
de orden	de fábrica	n_1 (con la carga P_1)	n_2 (con la carga P_2)						
1									
1'									
2									
2'									
3									
3'									
4									
7									
5									
6									

dios de σ calculados como promedios aritméticos para los puntos simétricos *1* y *1'* (fig. 34), *2* y *2'*, *3* y *3'*, *4* y *7*, *5* y *6*.

EXPERIMENTO II. TORSIÓN DE BARRAS DE SECCIÓN CIRCULAR

1. Datos generales. El propósito del experimento consiste en estudiar qué dependencia existe entre la carga y la deformación del árbol, determinar el módulo de deslizamiento G del material y las tensiones principales en la capa superficial del árbol.

El ángulo de torsión de la barra dentro de los límites de las deformaciones elásticas está relacionado con la carga, es decir, con el momento torsional, con una dependencia lineal. Para un árbol de sección circular el ángulo de torsión se determina por la fórmula,

$$\theta = \frac{M_{tor} l}{G I_p}, \qquad (2)$$

donde l es la longitud del árbol, M_{tor} es el momento torsional, G es el módulo de elasticidad del material durante el deslizamiento (o simplemente módulo de deslizamiento) llamado también módulo de elasticidad de segundo género, J_p es el momento polar de inercia del área de la sección transversal del árbol; para una sección enteriza $J_p = \pi d^4/32$, aquí d es el diámetro de la sección. Para un árbol hueco

$$J_p = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32},$$

donde D es el diámetro exterior y d es el diámetro interior de la sección

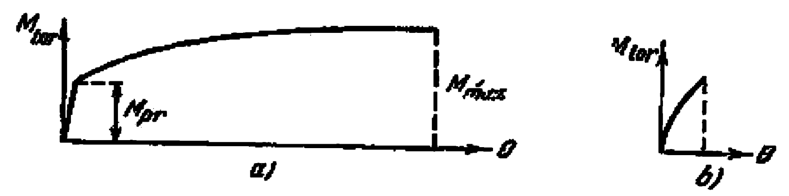


Fig. 35. Diagrama de torsión de la probeta pobre en carbono.

Para el árbol hueco, cuando el espesor de la pared t es menor que un cuarto del radio, se utiliza la fórmula aproximada (su error es menor que un 3%).

$$J_p = 2\pi r_m^3 t,$$

donde r_m es el radio medio de la sección.

La proporcionalidad señalada entre la carga y la deformación se observa en la etapa inicial de torsión de la probeta; luego, al igual que para la tracción o la compresión, la proporcionalidad se altera y llega un aumento rápido del ángulo de torsión con un crecimiento insignificante del momento torsional. Este último crece hasta la destrucción de la probeta. En ésta no se forma cuello. En la fig. 35, *a* se representa el diagrama de torsión para el acero pobre en carbono, en la fig. 35, *b*, el diagrama para una probeta de fundición de las mismas dimensiones aproximadamente (la fundición no obedece a la ley de la proporcionalidad).

El módulo G está ligado con el módulo de elasticidad de primer género E por medio de la siguiente relación:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \tag{3}$$

donde μ es el coeficiente de Poisson.

Las tensiones tangenciales máximas durante la torsión del árbol se determinan por la fórmula conocida

$$\tau = \frac{M_{tor}}{W_p}, \tag{4}$$

donde W_p es el momento polar de resistencia de la sección;

para sección enteriza $W_p = \frac{\pi d^3}{16}$,

para sección hueca $W_p = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{16D}$,

para tubo de paredes delgadas aproximadamente $W_p = 2\pi r_m^2 t$.

El error de la última fórmula no excede un 3% para $t \leq 0{,}1\ r_m$. Sobre las secciones transversales y longitudinales del árbol actúan

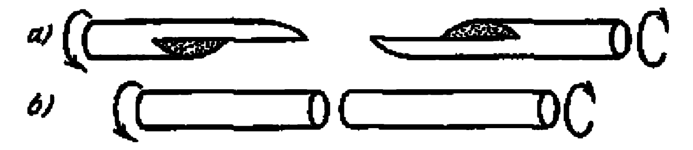


Fig. 36. Aspecto de las probetas cilíndricas destruidas en la torsión: *a*, de fundición y *b*, de acero

tensiones máximas tangenciales. En estas secciones no hay tensiones normales. Así, pues, ocurre un deslizamiento puro.

Las tensiones principales σ_1 y σ_2 son paralelas a la superficie del árbol y están dirigidas bajo un ángulo de 45° hacia las generatrices. Se pueden obtener las magnitudes de σ_1 y σ_2 del experimento si medimos con extensómetros las deformaciones de la probeta en las direcciones señaladas. Teóricamente σ_1 y σ_2 son iguales a $\pm\tau$.

La presencia de las tensiones normales en los planos inclinados bajo un ángulo de 45° a la generatriz del árbol se confirma con evidencia al destruir una probeta de fundición. La fundición, que resiste poco la tracción, se destruye en la torsión como resultado del desprendimiento del material por la superficie helicoidal inclinada a la generatriz bajo un ángulo de 45° (fig. 36, *a*).

La destrucción del acero durante la torsión ocurre a causa del cizallamiento en la sección transversal (fig. 36, *b*).

Los experimentos de torsión se realizan en las máquinas descritas en los §§ 16 y 19, o en la instalación que se analizará más adelante.

2. Instalación de mesa KM-600 para los ensayos de torsión. La instalación de mesa KM-600 se destina para los ensayos de

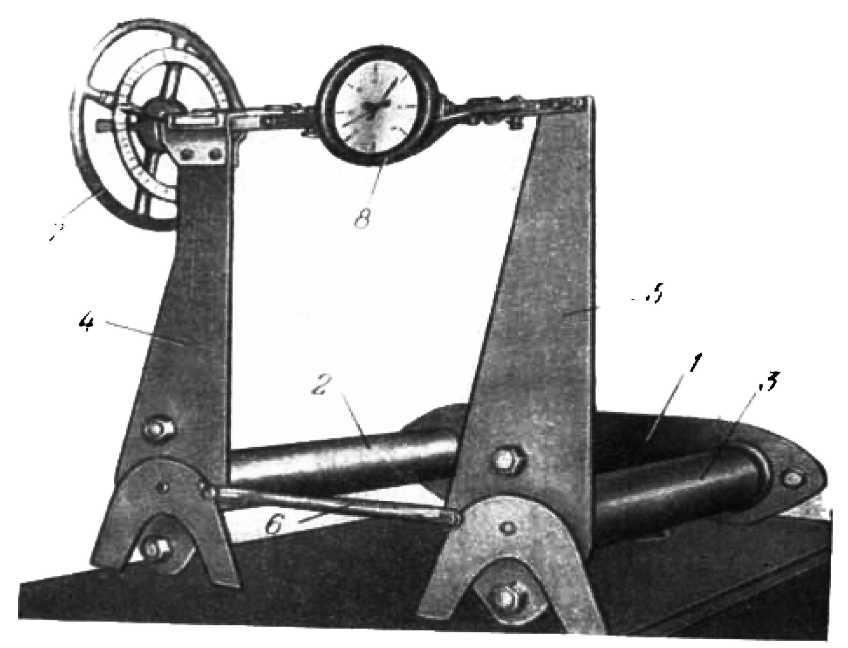


Fig. 37 Instalación de mesa para los ensayos de torsión, momento máximo de 600 kgm: *1*, plancha de acero; *2* y *3*, probetas; *4* y *5*, palancas del excitador de fuerza; *6*, tirante; *7*, rueda-tornillo que aprieta los extremos de las palancas; *8*, dinamómetro.

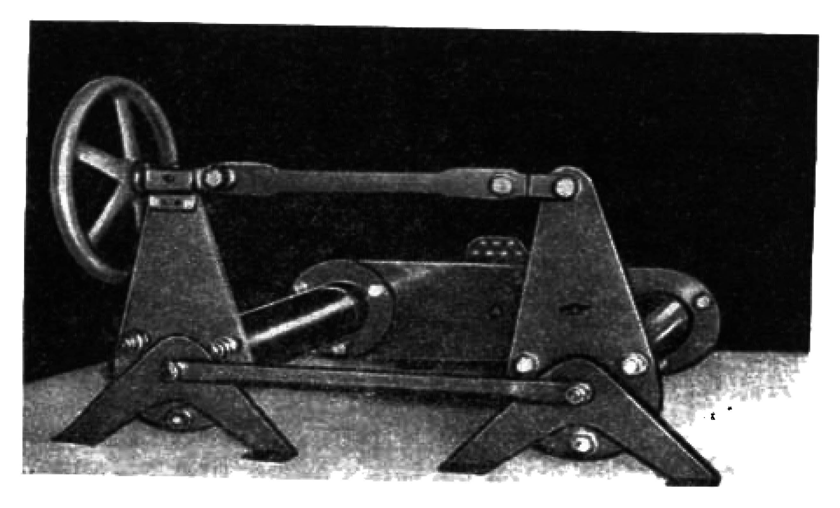


Fig. 38 Variante de la instalación de mesa para los ensayos de torsión.

torsión de tubos de paredes delgadas dentro de los límites de la elasticidad. El momento torsional máximo es de 600 kgm.

La instalación se presenta en la fig. 37. Los tubos *2* y *3* están unidos rígidamente con sus extremos a la prancha *1* de acero. A los otros extremos de los tubos están sujetadas también rígidamente las palancas *4* y *5*. Los extremos superiores de las palancas se empalman con un tornillo. La fuerza de tracción se mide con el dinamómetro *8*. El tornillo se aprieta a mano mediante la rueda *7*.

Al cambiarse el esfuerzo del tornillo, se cambia el momento torsional que actúa sobre los tubos *2* y *3*. Si el esfuerzo del tornillo es P, el momento que tuerce el tubo es igual a Ph, donde h es la longitud de la palanca. De esta manera, el momento torsional es proporcional al esfuerzo del tornillo y, por consiguiente, en la escala del dinamómetro graduada en kgm se puede leer la magnitud del momento torsional.

Para evitar la flexión de los tubos, entre ellos se coloca el tirante *6*.

Sobre los tubos se instalan los extensómetros para medir las tensiones. Se dejan los bordes de los tubos no empotrados y un poco sobresalientes para facilitar su medición. La instalación está dotada de un torsiómetro para medir los ángulos de torsión de la probeta.

El torsiómetro es un indicador que registra la aproximación de las palancas *4* y *5*. Esta aproximación es proporcional al ángulo de torsión.

Una variante de la instalación descrita fabricada por el Buró especial de diseño del Ministerio de enseñanza superior y especial media de la URSS bajo el nombre de CM-25 puede verse en la fig. 38. Aquí el dinamómetro de muelle se ha cambiado por una barra que tiene instalado un extensómetro para medir el esfuerzo.

3. Torsiómetro de aguja. Para medir los ángulos de torsión se utilizan torsiómetros de aguja, de espejo y otros.

El esquema del torsiómetro de aguja está mostrado en la fig. 39. En la probeta 1 que se ensaya a la torsión se sujetan las abrazaderas *2* y *3* con las agujas inmóviles *4* y *5*. Al efectuarse la torsión de la probeta, el ángulo θ_2 de giro de la sección *2* del árbol es mayor que el ángulo θ_3 de giro de la sección *3*, porque la sección *2* está más alejada del empotramiento *B* que la sección *3*. La diferencia $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_3$ es el ángulo de torsión del árbol ensayado en la longitud l entre las secciones *2* y *3*. Como se ve del dibujo, $\Delta\theta = \Delta n/r$, donde Δn es la diferencia de los incrementos de las lecturas en los arcos *II* y *I*, y r es la longitud de la aguja (medida desde eje del árbol).

El dispositivo descrito se distingue por su simplicidad. Es cómodo para el trabajo, si la compresibilidad del empotramiento *B* no es grande. El torsiómetro de aguja puede ser utilizado con éxito, por ejemplo, para la calibración del torsiómetro estacionario de la máquina KM-600 descrita anteriormente.

En las págs. 186—188 están descritos otros tipos de torsiómetros: de espejo y con escala móvil.

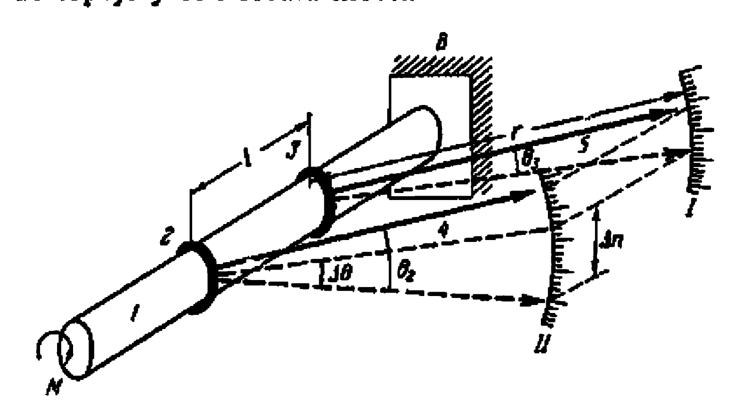


Fig. 39 | Esquema del torsiómetro de aguja. La diferencia de las lecturas Δn es proporcional al incremento del momento torsional.

4. Determinación del módulo de deslizamiento G. El módulo de deslizamiento *G* se determina a partir de la siguiente igualdad:

$$G = \frac{\Delta M_{tor} l}{I_p \Delta\theta}; \tag{5}$$

aquí ΔM_{tor} es el incremento del momento torsional que corresponde al incremento medio $\Delta\theta$ del ángulo de torsión.

El incremento del ángulo de torsión $\Delta\theta$ se calcula por la fórmula

$$\Delta\theta = \frac{\Delta n_m}{r}, \tag{6}$$

donde Δn_m es el valor medio del incremento de la diferencia de lecturas. Este valor se determina de la línea interior de la tabla 22, donde se presenta la forma de registro durante el uso de los torsiómetros de aguja.

Al utilizar los espejos, la fórmula (6) se sustituye por la siguiente:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta n_m}{2L}. \tag{7}$$

Tabla 22

Momento torsional M en kgfcm							Incremento del momento torsional $\Delta M =$
Lecturas de los arcos (o de las reglas) en cm	Arco I n^{I}						
	Arco II n^{II}						
Diferencia de las lecturas $n = n^{II} - n^{I}$							
Incremento de la diferencia de lecturas Δn							Incremento medio de la diferencia de lecturas $\Delta n_m =$

En el caso de torsiómetro con escala móvil (pág. 188), el registro se realiza de acuerdo a la forma más simple indicada en la tabla 23.

Tabla 23

Momento torsional M en kgfcm				$\Delta M =$
Lectura del torsiómetro n				
Incremento de la lectura Δn				Incremento medio de las lecturas $\Delta n_m =$

Se puede utilizar la tabla 22 también para el torsiómetro con escala móvil sin llenar las líneas 2 y 3 de la tabla. La diferencia de las lecturas se toma en la escala y se anota inmediatamente en el registro.

5. Determinación de las tensiones principales. La ley de Hooke para el estado de tensión plano se expresa del modo siguiente:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x); \tag{8}$$

aquí σ_x y σ_y son las tensiones normales en los planos mutuamente perpendiculares;

ε_x y ε_y son los alargamientos relativos en las direcciones de acción de σ_x y σ_y respectivamente.

De las fórmulas (8) tenemos:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y); \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x). \tag{9}$$

Sustituyendo los alargamientos relativos ε_x y ε_y por los absolutos Δs_x y Δs_y con ayuda de las fórmulas,

$$\varepsilon_x = \Delta s_x / s \quad \text{y} \quad \varepsilon_y = \Delta s_y / s,$$

donde s es la base del extensómetro, en vez de las fórmulas (9) obtendremos las siguientes:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}\frac{\Delta s_x + \mu\,\Delta s_y}{s}; \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}\frac{\Delta s_y + \mu\,\Delta s_x}{s}; \tag{10}$$

Los extensómetros *1* y *2* (fig. 40) se sitúan con una inclinación de 45° respecto a la generatriz de la probeta. Precisamente

Fig. 40 | Ubicación de los extensómetros sobre la superficie del árbol. Los extensómetros *1* y *2* con una inclinación de 45° con respecto a la generatriz del árbol, marcan unas deformaciones de igual magnitud, pero de diferente signo.

en estas direcciones actúan las tensiones principales[1]) σ_1 y σ_2 que son iguales en magnitud absoluta, pero de signo diferente. Es decir, también los alargamientos Δs_1 y Δs_2 en estas direcciones son iguales en magnitud absoluta y tienen diferentes signos. Designemos

$$\Delta s_1 = -\Delta s_2 = \Delta s. \tag{11}$$

Entonces por las fórmulas (10) obtendremos:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1+\mu}\frac{\Delta s}{s}, \quad \sigma_2 = -\frac{E}{1+\mu}\frac{\Delta s}{s}. \tag{12}$$

Prácticamente las deformaciones medidas Δs_1 y Δs_2 pueden diferenciarse un poco por su valor absoluto a causa de inexactitudes en el experimento. Hay que determinar la magnitud de Δs como promedio de las magnitudes absolutas Δs_1 y Δs_2, es decir,

$$\Delta s = \frac{1}{2}(|\Delta s_1| + |\Delta s_2|) \quad \text{ó} \quad \Delta s = \frac{1}{2}\left(\frac{|\Delta n_1|}{K_1} + \frac{|\Delta n_2|}{K_2}\right), \tag{13}$$

donde Δn_1 y Δn_2 son las diferencias de las lecturas en los extensómetros, y K_1 y K_2 son aumentos de los extensómetros.

[1]) Examinando el estado tensional como tridimensional, se debe poner σ_1 y σ_3 en vez de σ_1 y σ_2.

Tabla 24

Momento torsional, M, kgfcm							Incremento del momento torsional $\Delta M =$
Lecturas de los extensómetros	1er extensómetro K_1	Lectura n_1					
		Incremento de la lectura Δn_1					Incremento medio de la lectura $\Delta n_{1m} =$
	2do extensómetro K_2	Lectura n_2					
		Incremento de la lectura Δn_2					Incremento medio de la lectura $\Delta n_{2m} =$
	3er extensómetro K_3	Lectura n_3					
		Incremento de la lectura Δn_3					Incremento medio de la lectura $\Delta n_{3m} =$

Registramos las observaciones para la determinación de Δn_1 y Δn_2 según la forma indicada en la tabla 24.

Una vez determinadas Δn_1 y Δn_2 de la tabla 24, hallaremos Δs por la fórmula (13) y luego las tensiones principales σ_1 y σ_2 por las fórmulas (12).

El extensómetro *3* (fig. 37) puesto a lo largo de la generatriz no debe marcar los cambios de lecturas.

Generalmente, se observan el torsiómetro y el extensómetro a la vez. Por lo tanto las tablas 23 y 24 se unen.

Para revisar los valores de las tensiones principales σ_1 y σ_2 obtenidos experimentalmente, es posible utilizar el hecho de que durante la torsión

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{máx},$$

donde $\tau_{máx}$ es la tensión tangencial máxima en la sección transversal del árbol que se determina por la fórmula,

$$\tau_{máx} = \frac{M_{tor}}{W_p}. \quad (14)$$

EXPERIMENTO 12. TORSIÓN DE BARRAS DE SECCIÓN RECTANGULAR

1. Datos generales. En este experimento se examinan las mismas cuestiones que en el experimento anterior de torsión de barras de sección circular.

El propósito del experimento es conocer la torsión de barras de sección rectangular y sus particularidades. Durante el ensayo se debe: 1) determinar el ángulo de torsión de una barra de acero de sección rectangular dentro de los límites de la elasticidad, 2) determinar, con extensómetros, las tensiones tangenciales en los puntos *1* y *2* (fig. 41) de la sección de la barra cerca de su superficie, 3) mediante un modelo de caucho determinar el carácter del cambio de deformación de desplazamiento por el ancho de la probeta.

Comparar los valores obtenidos del ángulo de torsión y de las tensiones en los puntos medios de los lados de la sección con los valores teóricos.

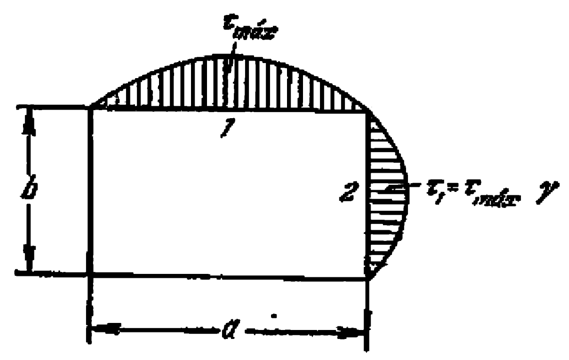


Fig. 41 | Gráficos de tensiones tangenciales cerca del borde de la sección durante la torsión de una barra de sección rectangular.

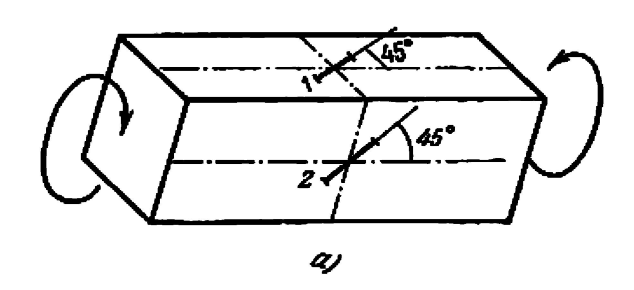
2. Preparación y realización del ensayo. El experimento se efectúa sobre una probeta de acero. La realización de la segunda parte de la tarea requiere una potencia grande tanto de la probeta, como de la máquina. Cuanto más grande sea la base del extensómetro, tanto mayores serán las dimensiones transversales de la probeta. En el caso de emplear los extensómetros de hilo desnudo con una base de 5—8 mm, puede utilizarse una probeta con una sección de 4 × 6 cm. La potencia correspondiente de la máquina es de alrededor de 150—200 kgm. Se puede realizar el trabajo en la máquina KM-600 descrita en el experimento 11.

En el caso de una evaluación aproximada de las tensiones para las probetas de dimensiones señaladas pueden ser utilizados los extensómetros con la base de 10—15 mm y en el lado ancho de la probeta pueden instalarse los extensómetros con la base de 20 mm. En este caso el resultado se reducirá insignificantemente.

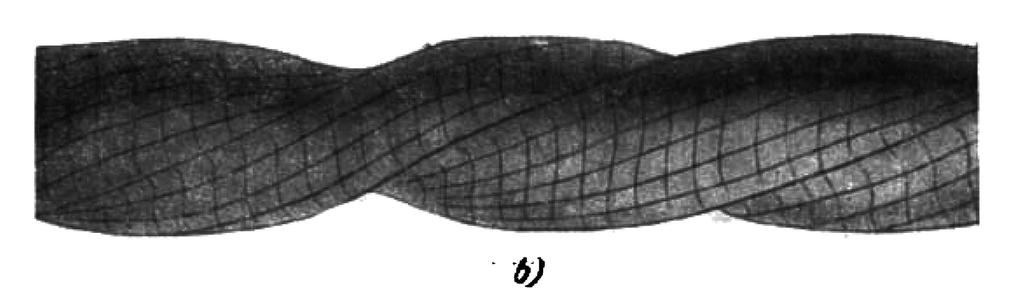
Los extensómetros se ponen en la superficie de la probeta con inclinación hacia su eje, o sea, bajo un ángulo de 45° respecto a la generatriz (fig. 42, *a*).

La medición del ángulo de torsión se realiza con torsiómetros semejantes a los descritos en el experimento 11. Para el ensayo en la máquina KM-600 no se necesita ningún torsiómetro, porque ésta tiena una escala para medir pequeños ángulos de torsión.

Registramos las observaciones según la forma que aparece en la tabla 25.



a)



b)

Fig. 42 | *a*. Direcciones de instalación de los extensómetros *1—2* para determinar las tensiones tangenciales máximas durante la torsión de una barra de sección rectangular; *b*, deformación grande del modelo de goma de la barra de sección rectangular en la torsión; los desplazamientos máximos se observan en medio de las caras; cerca de las aristas los desplazamientos no se observan.

3. Comparación de los resultados del experimento con los datos teóricos. El problema de torsión de una barra maciza de sección rectangular no se resuelve teóricamente de manera elemental. Esta tarea la cumple la teoría de la elasticidad. A continuación citamos los resultados principales de esta solución.

El ángulo de torsión por unidad de longitud de la barra es

$$\vartheta = \frac{M_{tor}}{G\alpha ab^3}. \quad (15)$$

Los gráficos de las tensiones tangenciales de torsión cerca de la superficie de la barra en su sección transversal tienen aproxi-

Tabla 25

Momento torsional M_{tor}, kgfcm					Incremento del momento torsional ΔM_{tor} =
Lectura del torsiómetro n					
Incremento de la lectura Δn					Incremento medio de la lectura Δn_m =
Lectura del extensómetro $1n_1$					
Incremento de la lectura Δn_1					Incremento medio de la lectura Δn_{1m} =
Lectura del extensómetro $2n_2$					
Incremento de la lectura Δn_2					Incremento medio de la lectura Δn_{2m} =

madamente el aspecto mostrado en la fig. 41. La tensión tangencial máxima corresponde al centro de la cara ancha de la barra y se determina por la fórmula,

$$\tau_{máx} = \frac{M_{tor}}{\beta a b^2}. \tag{16}$$

La tensión tangencial en el centro de la cara estrecha,

$$\tau_1 = \gamma \tau_{máx}. \tag{17}$$

Los coeficientes α, β y γ que figuran en las fórmulas (15), (16) y (17) son funciones de la relación a/b de los lados de la sección de la barra, siendo b el lado menor. Algunos valores de α, β y γ que corresponden a ciertos valores de a/b, se presentán en la tabla 26.

Como se ve por los gráficos, cerca de las aristas la tensión tangencial es igual a cero. Para convencerse de esto, basta observar una red rectangular trazada sobre la superficie de la barra hecha de caucho (fig. 42, *b*). Produciendo en tal barra una deformación considerable de torsión, podemos ver que los cuadros anteriormente rectangulares van transformándose en paralelogramos. Los cuadros ubicados en medio de a cara ancha de la barra están sometidos a la mayor deformación. Cerca de las aristas de la barra la deformación no se nota, es decir, la deformación de deslizamiento y, por supuesto, las tensiones tangenciales aquí son iguales a cero.

Tabla 26

a/b	α	β	γ	a/b	α	β	γ
1	0,208	0,141	1,000	4	0,281	0,281	0,745
1,5	0,231	0,196	0,859	6	0,299	0,299	0,743
1,75	0,239	0,214	0,820	8	0,307	0,307	0,742
2	0,246	0,229	0,795	10	0,313	0,313	0,742
2,5	0,258	0,249	0,766	∞	0,333	0,333	0,742
3	0,267	0,263	0,753				

EXPERIMENTO 13. ENSAYO DEL RESORTE HELICOIDAL

1. Datos generales. El propósito del experimento consiste en determinar la deformación del resorte y el módulo de deslizamiento del material. El ensayo se realiza del modo siguiente:

El resorte se suspende verticalmente de un apoyo rígido (fig. 43) por un extremo que coincide con el eje del resorte; de otro extremo

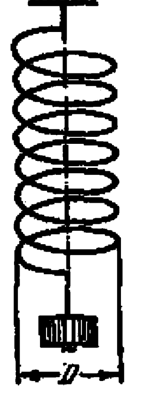


Fig. 43 | Esquema del ensayo del resorte.

que también coincide con el eje, se cuelga el peso. El desplazamiento del extremo inferior del resorte bajo la acción del peso se llama deformación del resorte y se mide visualmente o mediante un comparador según la rigidez del resorte. Para hacer más evidente el experimento, se deben elegir las dimensiones del resorte de tal manera que se pueda medir su deformación directamente con regla. En el caso de un alambre de acero con un diámetro de 4 mm y para el diámetro del resorte $D = 10$ cm, la deformación por una espira debida a la carga $P = 1$ kgf será alrededor de 4 mm. Si el número de espiras es demasiado grande, la deformación del resorte será del orden de unos cuantos centímetros. Tal deformación puede ser medida con regla con bastante precisión.

Es conveniente cargar el resorte escalonadamente para convencerse de la linealidad de la dependencia entre la carga y la deformación del resorte. En el caso de un resorte con las dimensiones señaladas anteriormente, pueden tomarse los siguientes escalones de la carga: 300, 600, 900 gf.

Las observaciones se anotan en el registro de laboratorio de acuerdo con la forma que presenta la tabla 27. En la primera columna se ponen los valores de la carga, empezando por cero. En la segunda, las lecturas de la regla o cualquier fleximetro; en la tercera, los incrementos de lecturas que son iguales aproximadamente para intervalos iguales de la carga.

Tabla 27

Carga P	Lecturas del fleximetro	Incremento de lecturas	Incremento medio de la lectura

2. Interpretación de los resultados del ensayo. A base de los resultados del ensayo se determina el incremento medio de la lectura del flexímetro, igual al valor de Δh de la deformación del resorte que corresponde al incremento aceptado ΔP de la carga

Para un resorte con pequeño paso de espiras la deformación se determina por medio de la fórmula,

$$h = \frac{8PD^3n}{Gd^4}, \qquad (18)$$

donde D es el diámetro del resorte, d es el diámetro del alambre, n es el número de espiras, G es el módulo de deslizamiento del material del resorte.

A base de la fórmula (18) el módulo de deslizamiento es

$$G = \frac{8\,\Delta P D^3 n}{\Delta h d^4}.$$

Hay que tomar en consideración que el diámetro del alambre se determina como el promedio aritmético de varias mediciones en diferentes lugares del resorte, hechas con micrómetro.

EXPERIMENTO 14. ENSAYO DE LA VIGA A FLEXIÓN

A. TENSIONES DE FLEXIÓN

1. Datos generales. El propósito del experimento consiste en investigar la ley de distribución de las tensiones normales por la sección de la viga de flexión plana y determinar las tensiones principales en la fibra neutra.

Se llama flexión plana aquella flexión de la viga, cuando las fuerzas de acción se encuentran en uno de los dos planos principales de la viga. Esta se encorva en el mismo plano.

Las tensiones normales σ en la sección transversal de la viga de la flexión plana se determinan por la fórmula,

$$\sigma = \frac{My}{J}, \tag{19}$$

donde M es el momento flector en la sección dada; J es el momento de inercia de la sección de la viga respecto a la línea neutra (que coincide con el eje central principal de inercia de la sección); y es la distancia de la línea neutra hasta el punto de la sección en donde se determina la tensión.

La dependencia lineal expresada por la fórmula (19), gráficamente se representa por la recta mostrada en la parte derecha de la fig. 47.

Las tensiones normales máximas corresponden a los puntos más alejados de la línea neutra:

$$\sigma_{máx} = \frac{M}{J} y_{máx} = \frac{M}{W}. \tag{19'}$$

Aquí $W = J/y_{máx}$ es el módulo de la sección.

Las tensiones principales de flexión:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}, \tag{20}$$

siendo $\tau = QS^*/Jb$ la tensión tangencial en la sección transversal en el punto dado.

Aquí Q es la fuerza cortante en la sección; S^* es el momento estático del área de la sección que se encuentra por un lado de la capa donde se determina la tensión, respecto a la línea neutra de la sección; b es el ancho de la sección en el lugar dado.

La capa neutra de la viga (donde $\sigma = 0$ y $\tau \neq 0$) experimenta deslizamiento puro, por lo tanto,

$$\sigma_{1,3} = \pm\tau = \pm\frac{QS_0^*}{Jb}, \tag{21}$$

siendo S_0^* el momento estático del área de la semisección.

Las direcciones de las tensiones principales en la capa neutra de la viga forman con su eje ángulos iguales a 45°.

Determinando las tensiones principales en la capa neutra, como se ve por la fórmula (21), hallamos también las magnitudes de las tensiones tangenciales máximas iguales a las primeras.

2. Instalaciones de ensayo. El estudio del trabajo de una viga a la flexión se efectúa sobre las vigas de sección en doble T. La colocación se realiza según los esquemas de la fig. 44. Con las letras $a — b$ en los esquemas se indican las secciones ensayadas.

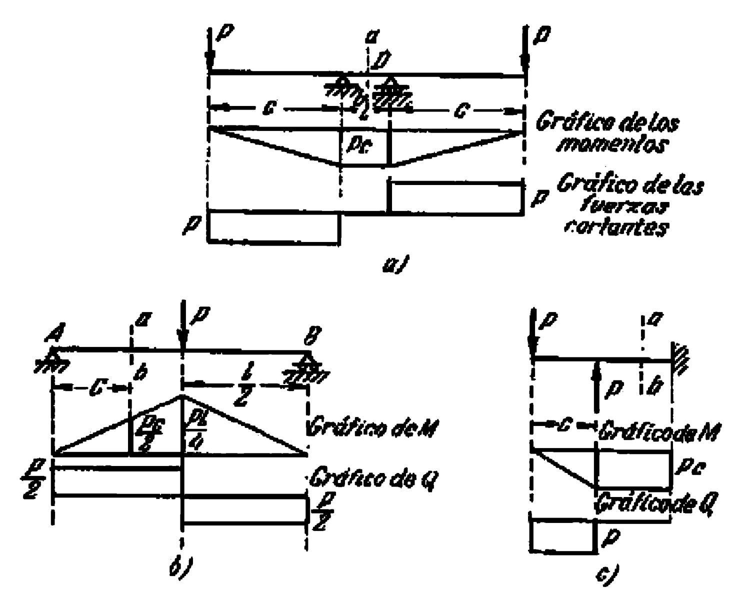


Fig. 44 | Esquemas de las vigas que se ensayan a flexión. En las secciones $a — b$ se instalan los extensómetros.

La instalación estacionaria según el esquema de la fig. 44, *a*, utilizada ya hace tiempo en los laboratorios, es una viga laminada de acero en doble T № 16 ó 18 con una longitud de 7—8 m.

La distancia entre los apoyos es alrededor de 1,5 m. En los extremos de los voladizos la viga está dotada de plataformas sobre las cuales se ponen los pesos de 15—20 kgf durante la realización del experimento. En tal instalación pueden investigarse de una manera clara las tensiones y las deformaciones de flexión.

Por lo general, en las máquinas se ensayan las vigas más cortas por el esquema de la fig. 44, *b*. La longitud de esta viga es igual a 1—2 m, según el tipo de la máquina. Para ensayar las vigas a flexión, las máquinas tienen dispositivos en forma de cabezales con apoyos en los extremos y cuchillos supletorios, por medio de los cuales se efectúa la carga. La prensa de Amsler con una fuerza de 200 tf (véase la descripción de la prensa en el ex-

perimento 3) está dotada de un cabezal móvil *1* (fig. 45) de 2 m de largo en forma de viga remachada en doble T que se instala sobre el émbolo motor *2* del cilindro hidráulico de la máquina.

La viga ensayada *3* se monta sobre los apoyos *A* y *B* que tiene el cabezal. El cuchillo del cabezal de apoyo *4* se lleva hasta el contacto con la viga. Luego, mediante la bomba, se eleva la presión en el cilindro de la prensa que provoca la elevación del cabezal y, por supuesto, la flexión de la viga *3*.

Las demás máquinas (véase, por ejemplo, en la pág. 249 la descripción de la máquina universal de 30 toneladas-fuerza) tienen dispositivos semejantes para la flexión de las vigas, siendo los cabezales estacionarios de 1 m de longitud.

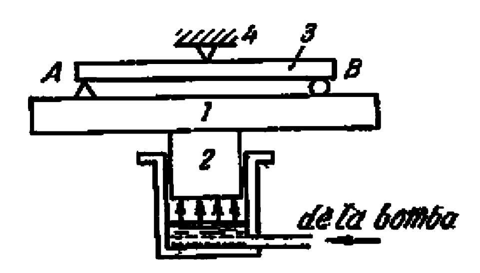


Fig. 45 | Flexión de la viga en una prensa hidráulica: *1*, cabezal móvil de la máquina; *2*, émbolo motor; *3*, viga que se ensaya; *4*, cabezal de apoyo.

Véase la descripción de las instalaciones de mesa para la flexión en la pág. 305.

3. Determinación de las tensiones normales en la sección transversal de la viga. Las tensiones normales se determinan mediante la medición de los alargamientos, utilizando los extensómetros de palanca (véase la descripción en la pág. 39) o eléctricos (pág. 177). En la fig. 46 se muestra la fijación del extensómetro de palanca al ala de la viga por medio de mordaza. Los extensómetros *1*, *2*, *3*, *4* y *5* (fig. 47) están situados de tal manera que puedan medir los alargamientos a lo largo del eje de la viga. Una vez determinados los alargamientos, hallemos las tensiones normales en la sección transversal dada de la viga a base de la dependencia lineal $\sigma = E\varepsilon$, correspondiente a la suposición principal de la teoría elemental de la flexión sobre la ausencia de tensiones normales en las secciones longitudinales de la viga.

Los extensómetros *1* y *5* están ubicados en las caras exteriores de las alas de los doble T, poniendo en cada ala dos extensómetros, de cuyas lecturas se debe sacar el promedio aritmético durante la interpretación de los resultados del ensayo. Los extensómetros *2* y *4* están puestos a una distancia de un cuarto de

la altura de la sección de la viga desde la capa neutra, y el extensómetro *3*, en la capa neutra de la viga.

4. Realización del ensayo. Primeramente se debe cargar la viga con cierta carga inicial P_1 para eliminar todas las faltas de hermeticidad en el contacto de la viga con los apoyos y el dispositivo de carga. Luego se toman las lecturas n_1 de todos los extensómetros y se anotan en el registro en la forma que aparece en la tabla 28 [1]).

Aumentando la carga hasta cierta magnitud P_2, se vuelve a tomar las lecturas (n_2). El valor de la carga P_2 tiene que estar elegido deliberadamente dentro de los límites de la proporcionalidad del material. Por la

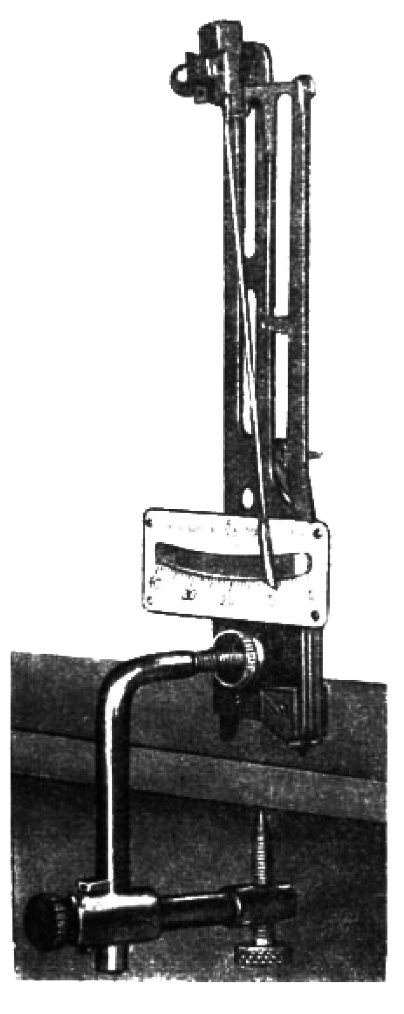


Fig. 46 | Extensómetro de palanca colocado sobre el ala de la viga en doble T.

diferencia de las lecturas se determinan los incrementos $\Delta\sigma$ de las tensiones que corresponden al incremento de la carga $\Delta P = P_2 - P_1$.

A fin de comprobar la elasticidad del material y para el control de las lecturas se recomienda, luego de llevar a cabo el en-

[1]) Si el ensayo se realiza con extensómetros eléctricos, hay que valerse de la forma de la tabla expuesta en la pág. 180.

sayo, descargando la viga un poco por debajo de la carga inicial, volver a aplicar la carga inicial y comparar las lecturas de los extensómetros con las iniciales.

El valor de la carga total P_2 depende de la potencia tanto de la viga, como de la máquina.

Los valores de $\Delta\sigma$ obtenidos durante el ensayo brindan la posibilidad de construir el diagrama de las tensiones que resulta una línea quebrada (fig. 47), próxima a la recta. En este mismo diagrama se traza, para comparar, la recta que se obtiene teóricamente de la fórmula (19).

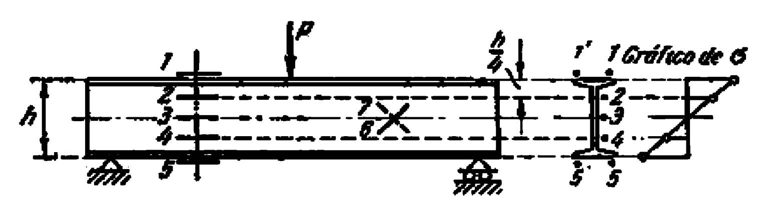


Fig. 47 | Colocación de los extensómetros sobre la viga. A base de los datos de los extensómetros *1—5* se construyen los gráficos de σ; los extensómetros *6* y *7* instalados cerca de la capa neutra de la viga bajo un ángulo de 45° a ésta, marcan unas deformaciones de igual magnitud, pero de diferente signo.

5. Determinación de las tensiones principales. Lo más fácil es determinar las tensiones principales cerca de la capa neutra de la viga. En la capa neutra las tensiones normales son iguales a cero en la sección transversal de la viga y su alma experimenta el deslizamiento puro que ya fue examinado al analizar la torsión en el experimento 11.

Para determinar experimentalmente las tensiones normales y la capa neutra de la viga, los extensómetros *6* y *7* (fig. 47) se colocan en ambas direcciones formando ángulos de 45° con la capa neutra.

Obtendremos los incrementos de las tensiones principales a partir de las fórmulas (12):

$$\Delta\sigma_{1,3} = \pm \frac{E}{1+\mu}\,\frac{\Delta s}{s}, \qquad (22)$$

donde

$$\Delta s = \frac{1}{2}\left(\frac{|\Delta n_6|}{K_6} + \frac{|\Delta n_7|}{K_7}\right). \qquad (23)$$

Aquí $|\Delta n_6|$ y $|\Delta n_7|$ son valores absolutos de los incrementos de las lecturas de los extensómetros *6* y *7*;

K_6 y K_7 son los aumentos de los extensómetros *6* y *7*;

s es la base del extensómetro.

Tabla 28

No. del extensómetro	Lecturas de los extensómetros, mm		Diferencia de las lecturas $\Delta n = n_2 - n_1$, mm	Aumento del extensómetro K	Base del extensómetro s, mm	$\beta = \frac{E}{Ks}$ para los extensómetros 1—5'; $\beta = \frac{E}{Ks(1+\mu)}$ para los extensómetros 6—7	Incremento de la tensión $\Delta\sigma = \beta\Delta n$, kgf/cm²	Incremento medio de la tensión para los extensómetros 1 y 1', 5 y 5', 6 y 7
	n_1	n_2						
	Carga $P_1 =$ ... kgf	Carga $P_2 =$ ... kgf						
1								
1'								
2								
3								
4								
5								
5'								
6								Medio por el valor absoluto
7								

Observación: la situación de los extensómetros se presenta en la fig. 47.

Sustituyendo la expresión Δs en la fórmula (22) obtenemos,

$$\Delta\sigma_{1,3} = \pm\frac{1}{2}(\beta_6|\Delta n_6| + \beta_7|\Delta n_7|),$$

siendo

$$\beta_6 = \frac{E}{(1+\mu)sK_6} \quad \text{y} \quad \beta_7 = \frac{E}{(1+\mu)sK_7}.$$

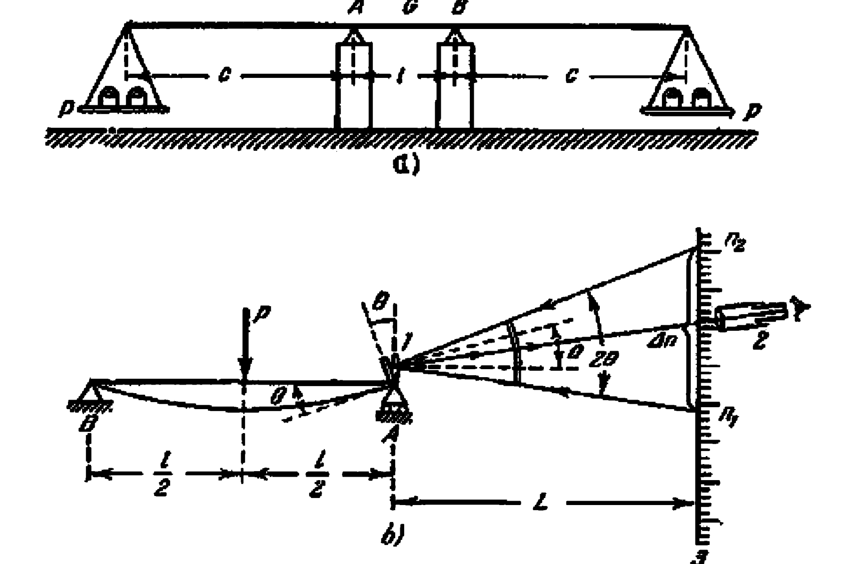
En el registro (tabla 28) se toma en cuenta que la expresión β contiene ahora en el denominador el factor $1+\mu$.

Las magnitudes de $\Delta\sigma_{1,3}$ obtenidas del experimento, se comparan con las teóricas:

$$\Delta\sigma_{1,3} = \pm\frac{\Delta Q S_0}{Jb} \quad \text{[véase la fórmula (21)]}.$$

B. DEFORMACION DE LA VIGA

1. Datos generales. El alumno debe medir las flechas y los ángulos de giro en algunas secciones de la viga para cualquier caso simple de flexión plana y comparar los datos obtenidos con los teóricos.



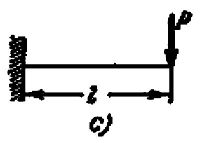


Fig. 48 | Sobre la determinación de los desplazamientos en la flexión. Los esquemas de las vigas ensayadas: *a*, viga con voladizos; *b*, viga simplemente apoyada con espejo instalado encima de ella para medir el ángulo de giro del apoyo *A*; *c*, voladizo.

Se dan datos teóricos para algunos esquemas de fijación y de carga de las vigas.

ESQUEMA I. Una viga sobre dos apoyos con voladizos (fig. 48, *a*); los gráficos de M y de Q para esta viga se dan en la fig. 44, *a*. La flecha de la viga en el punto G, en el centro es:

$$v_G = -\frac{Pcl^2}{8EJ}.$$

Los ángulos de giro en los puntos A y B sobre los apoyos son

$$\theta_A = -\theta_B = -\frac{Pcl}{2EJ}.$$

ESQUEMA II. Una viga simplemente apoyada (fig. 48, *b*); los gráficos de *M* y de *Q* para esta viga se presentan en la fig. 44, *b*. La viga está cargada con la fuerza *P* aplicada en medio de la luz.

La flecha debajo de la fuerza es

$$v_{0.5l}=\frac{Pl^3}{48EJ}.$$

Los ángulos de giro en los apoyos son

$$\theta_A=-\theta_B=\frac{Pl^2}{16EJ}.$$

ESQUEMA III. El voladizo está cargado con una fuerza concentrada aplicada en el extremo (fig. 48, *c*).

La flecha del extremo libre es

$$v_l=\frac{Pl^3}{3EJ}.$$

El ángulo de giro en este mismo lugar es

$$\theta_l=\frac{Pl^2}{2EJ}.$$

2. **Realización del ensayo.** Para medir los desplazamientos (flechas y ángulos de giro) se utilizan indicadores e inclinómetros (véase las págs. 185 y 188).

El registro de las observaciones con flexímetros y medidores de ángulos se realiza según la forma mostrada en la tabla 29.

Tabla 29

Instrumento		Lectura n de los instrumentos		Diferencia de lecturas Δn	Magnitud de los desplazamientos
		con carga $P_1=$	con carga $P_2=$		
Fexímetro					$v_{máx}=$
Medidor de ángulos	№ 1				$\theta=$
	№ 2				

Aplicando a la viga escalonadamente una carga progresiva en aumento, se puede comprobar la proporcionalidad entre los desplazamientos y la carga.

Los desplazamientos incógnitos —las flechas v y los ángulos de giro θ— se determinan como incrementos medios de las lec-

turas Δn, multiplicados por el valor de una división del instrumento correspondiente. De tal manera, la flecha medida con el indicador será:

$$v = \Delta n_v \cdot 0{,}01 \text{ en mm},$$

siendo Δn_v la diferencia media de las lecturas del indicador.

El ángulo de giro medido con el medidor de ángulos de nivel —inclinómetro— se determinará del modo siguiente:

$$\theta = \Delta n_\theta \cdot 0{,}0001 \text{ en radianes}.$$

El ángulo de giro por el inclinómetro de espejo es

$$\theta = \Delta n_\theta \frac{1}{2L}.$$

Comparando las magnitudes halladas de flechas y de ángulos de giro con las teóricas, hay que tener en cuenta que corresponden al incremento de la carga ΔP y por eso en las fórmulas teóricas se debe sustituir P por ΔP.

EXPERIMENTO 15. DETERMINACION DE LA POSICION DEL CENTRO DE FLEXIÓN DE UN PERFIL ABIERTO

1. Datos generales. El propósito del experimento consiste en hallar el centro de flexión y el centro de torsión restringida y mostrar su coincidencia.

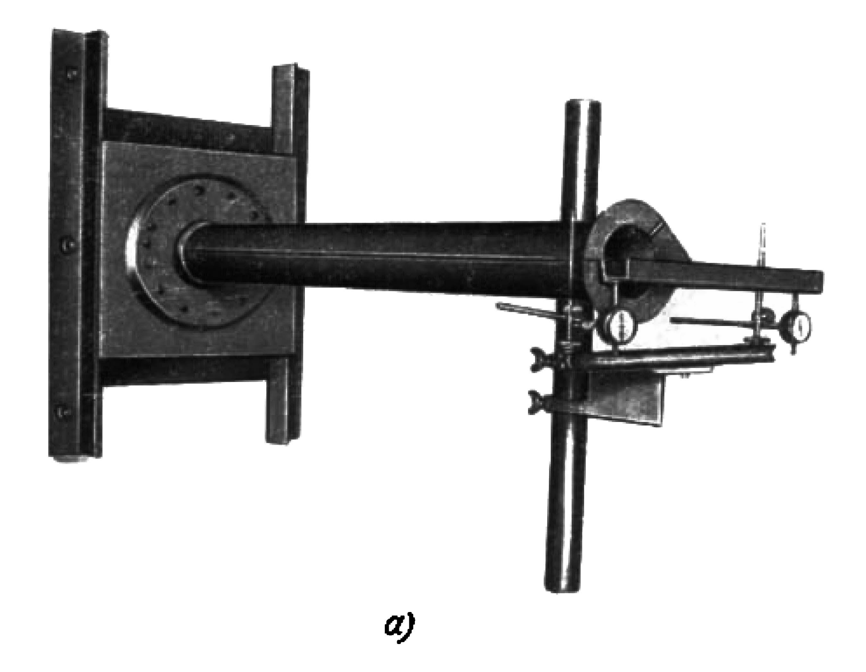


Fig 49 | Perfiles ensayados para determinar el centro de flexión.

Se llama centro de flexión de la barra en la sección dada un punto en el plano de la sección por el cual debe pasar la fuerza cortante (independientemente de la dirección de la flexión) de tal manera, que el desplazamiento de la sección en su plano sea de avance. Para cualquier otra posición de la fuerza cortante la sección gira en su plano, es decir, sucede la torsión de la barra.

El experimento se realiza sobre el voladizo largo [1]) de perfil de U o tubular abierto (fig. 49) fabricado de un tubo cerrado con una ranura longitudinal (fig. 50, *a*). Se estudian los desplazamientos del extremo libre del voladizo; en este extremo hay una brida que garantiza la invariabilidad de la sección extrema de la barra en su plano. A la brida está fijada rígidamente por el eje

[1]) Véase el caso de viga corta en la pág 318.



a)

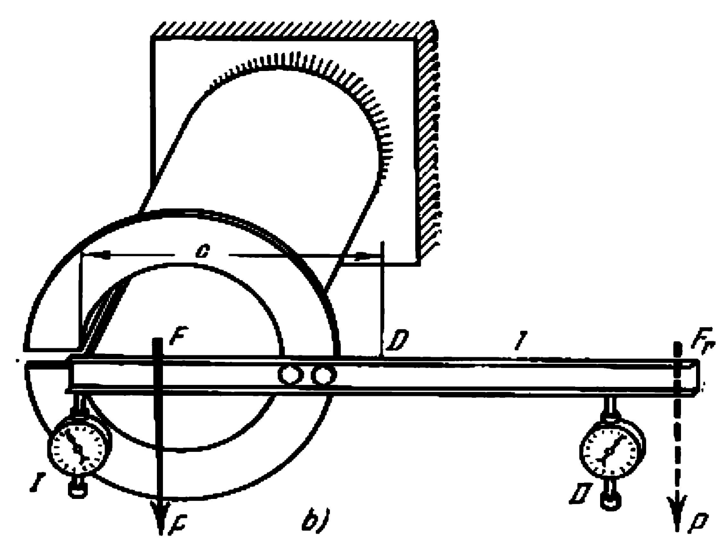


Fig. 50 | Colocación de los indicadores para determinar el centro de torsión: *a*, aspecto general de la instalación de ensayo; *b*, esquema de la instalación de ensayo: *1*, varilla rígida. Poniendo el peso *P* en el centro de flexión *D*, obtendremos en los indicadores *I* y *II* las magnitudes iguales de la flecha. Para cualquier otra posición del peso la varilla gira.

de la simetría del perfil la varilla *I* (fig. 50, *b*). El peso se aplica a uno u otro punto de la varilla o se traslada sobre ella en una carretilla. El traslado correspondiente de la varilla que caracteriza el desplazamiento de la sección extrema de la barra se mide con dos indicadores (véase la pág. 185), *I* y *II*.

Como resultado de este trabajo hay que determinar experimentalmente lo siguiente:

1) posición del centro de flexión mediante colocación de prueba del peso en la varilla;

2) torsión de la barra al colocar el peso en el centro de gravedad de la sección;

3) coincidencia del centro de giro de la sección extrema de la barra con el centro de flexión durante el movimiento del peso por la varilla;

4) dependencia del ángulo de giro (ángulo de torsión de la barra) de la posición del peso.

Durante el experimento se revela que al trasladarse el peso, la varilla gira alrededor de cierto punto constante. El ángulo de giro de la varilla, es decir, el ángulo de torsión de la barra, resulta proporcional a la distancia desde el centro de giro, o sea, al momento torsional.

Simultáneamente se determina que el centro de giro hallado, que se puede llamar centro de torsión, coincide con el centro de flexión determinado teóricamente.

2. Datos teóricos. La fuerza cortante Q se realiza en la sección de la viga como un sistema de esfuerzos tangenciales. Por eso el centro de flexión puede determinarse como el punto por el cual pasa la resultante de los esfuerzos tangenciales interiores de la sección.

El esfuerzo tangencial lineal de flexión plana

$$q = \frac{Q}{J} S, \tag{24}$$

siendo S el momento estático del área de una parte de la sección transversal ubicada a un lado del punto en la sección, en el cual se determina el esfuerzo tangencial, respecto al eje neutro de la sección.

Calculando, por ejemplo, la magnitud de q en el punto B del contorno del perfil tubular abierto (fig. 51, *a*), por S se debe entender el momento estático de la parte AB de la sección:

$$S = \int_0^{\varphi} ytr\, d\psi,$$

donde el producto $tr\, d\psi$ expresa el área elemental en la sección, y φ es el ángulo central que corresponde al arco AB.

Tomando en consideración que $y = r$ sen ψ, obtenemos:

$$S = tr^2 \int_0^\varphi \operatorname{sen} \psi \, d\psi = tr^2 (1 - \cos \varphi).$$

Determinaremos el centro de flexión del perfil, si expresamos el momento de las fuerzas q respecto a cualquier punto, por ejem-

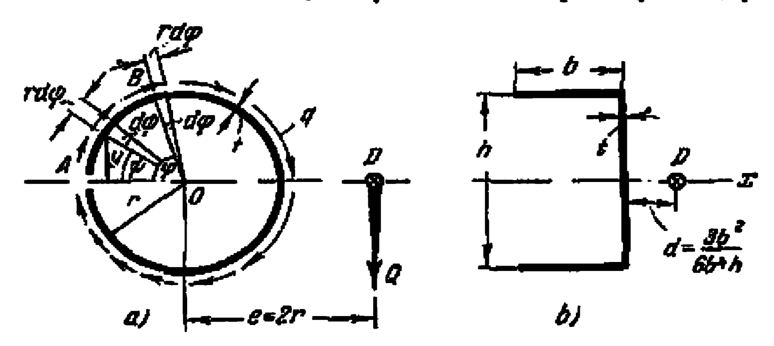


Fig. 51 | Posición del centro de flexión: *a*, para tubo redondo cortado por la generatriz *A*; *b*, para perfil de U.

plo, el centro de gravedad O, y lo igualamos al momento de su resultante Q, es decir,

$$\int_0^{2\pi} rqr \, d\varphi = eQ; \tag{25}$$

e es la distancia incógnita desde el centro de gravedad de la sección hasta el centro de flexión. Sustituyendo aquí el valor de q por la fórmula (24), conociendo la expresión para S, y teniendo en cuenta que el momento de inercia de la sección $J = \pi r^3 t$, hallamos:

$$e = 2r, \tag{26}$$

es decir, en un perfil tubular de espesor constante con una ranura (fig. 51, *a*), el centro de flexión D se encuentra a una distancia igual al diámetro desde el centro de la sección por el eje de simetría.

En el perfil de U de un espesor constante t (fig. 51, *b*) el centro de flexión se halla de la línea media de la pared a una distancia

$$d = \frac{b^2 h^2 t}{4 J_x} = \frac{3b^2}{6b + h}, \tag{27}$$

donde b es el ancho del ala y h es la altura del perfil.

Señalemos que las fórmulas (26) y (27) son correctas para vigas bastante largas. En el caso de una viga corta el centro de flexión se desplaza hacia el centro de deslizamiento (véase la pág. 318).

3. Realización del experimento e interpretación de los resultados. En dependencia de la posición de la fuerza P, el tope del voladizo sufre diferentes desplazamientos (fig. 52). Para medir estos desplazamientos se debe, ante todo, tomar las lecturas de ambos indicadores cuando falta la carga. Es cómodo que estas

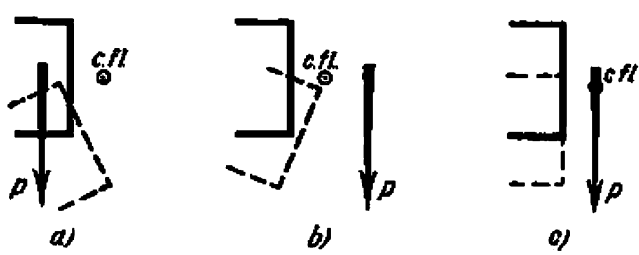


Fig. 52 Distintas posiciones del peso respecto al centro de flexión: *a* y *b*, peso que no se encuentra en el centro de flexión origina la torsión de la barra; *c*, peso en el centro de flexión no provoca la torsión de ésta; *c. fL*, centro de flexión.

lecturas sean iguales, por ejemplo a 500, lo que se logra colocando adecuadamente los indicadores. Aplicando luego la carga en el centro de gravedad de la sección, notamos que las lecturas de los indicadores *I* y *II* varían en forma desigual, es decir, la varilla (y por supuesto la sección extrema del voladizo) gira.

Ahora apliquemos el peso P en el centro de flexión D hallado teóricamente: las lecturas de los indicadores serán aproximadamente iguales. En este caso, los desplazamientos de todos los puntos de la sección son idénticos e iguales a la flecha teórica del voladizo bajo la acción de la fuerza concentrada en el extremo, es decir, $v = Pl^3/3EJ$. De esta manera, la fuerza P aplicada en *el centro de flexión* tan sólo flexiona la barra sin provocar su torsión.

Determinemos ahora la posición del *centro de giro* de la sección extrema del voladizo al trasladar el peso P por la varilla.

Apliquemos el peso en cierto punto F (fig. 50, *b*) y leamos en los indicadores las lecturas correspondientes n_1 y n_2. Anotemos estas lecturas en escala aumentada sobre las escalas uniformes *I* y *II* (puntos *a* y *b* en la fig. 53); el aumento de las lecturas en las escalas va de arriba para abajo. La distancia entre las escalas en escala disminuida es la distancia entre los indicadores.

Uniendo los puntos *a* y *b*, obtenemos una recta que refleja claramente el giro de la varilla (es decir, del eje de simetría del

perfil) para la posición dada del peso. Desplazando el peso P en otro punto, por ejemplo, F_1, y colocando nuevas lecturas de los indicadores sobre las escalas, fijamos en el dibujo la posición nueva $a'b'$ de la varilla. Las rectas ab y $a'b'$ se intersecan en el punto D; medimos la distancia c (fig. 53) en escala del dibujo y la comparamos con la distancia (fig. 50) desde el indicador I hasta el centro de flexión D hallado teóricamente. Determinamos la coincidencia de estos valores.

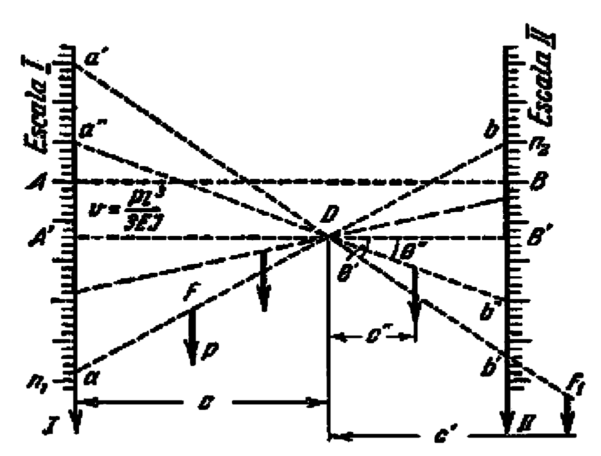


Fig. 53 | Determinación gráfica del centro de torsión. Trazando unas cuantas posiciones de la varilla (ab, $a'b'$, etc.) determinamos que el centro de giro de la varilla coincide con el centro de flexión del perfil.

Haciendo unos cuantos traslados del peso P y trazando las posiciones correspondientes de la varilla (en la fig. 53 se indican con línea punteada), nos convencemos de que todas las posiciones del borde de la varilla se intersecan en el punto D. Esto quiere decir que la sección de tope del voladizo gira alrededor del punto D al desplazarse el peso P.

Las líneas punteadas AB y $A'B'$ en la fig. 53 muestran la posición inicial de la varilla y su posición después de cargar la viga con la fuerza aplicada en el centro de flexión, respectivamente.

Al construir el diagrama de giros de la varilla (fig. 53) es notoria la proporcionalidad entre el ángulo de giro de la varilla, es decir, el ángulo de torsión de la barra, y la distancia del peso desde el centro de flexión D (que es proporcional al momento torsional). El ángulo de torsión es pequeño, por eso se puede considerar proporcional al incremento de la lectura por la escala I ó II que se toma desde la línea $A'B'$ correspondiente a la flecha de la flexión. La relación de los tramos, por ejemplo, $B'b''$ y $B'b'$,

en la escala *II* (fig. 53) es igual a la relación de los valores respectivos del ángulo de giro θ' y θ''. Al medir los tramos $B'b''$ y $B'b'$ y los brazos respectivos c'' y c' de la fuerza P vemos que $B'b''/B'b' = c''/c'$. Por lo tanto, $\theta''/\theta' = c''/c'$.

La forma del registro durante el experimento para $r = 6$ cm y la varilla con una longitud de 48 cm se da en la tabla 30. A base de los datos de la tabla 30 se construye el diagrama de giros de la varilla (fig. 53).

Tabla 30

Lecturas	Posición del peso (lecturas tomadas en la varilla en cm)				Sin peso	
	0	6	18	48	Antes del experimento	Después del experimento
del indicador *I*						
del indicador *II*						

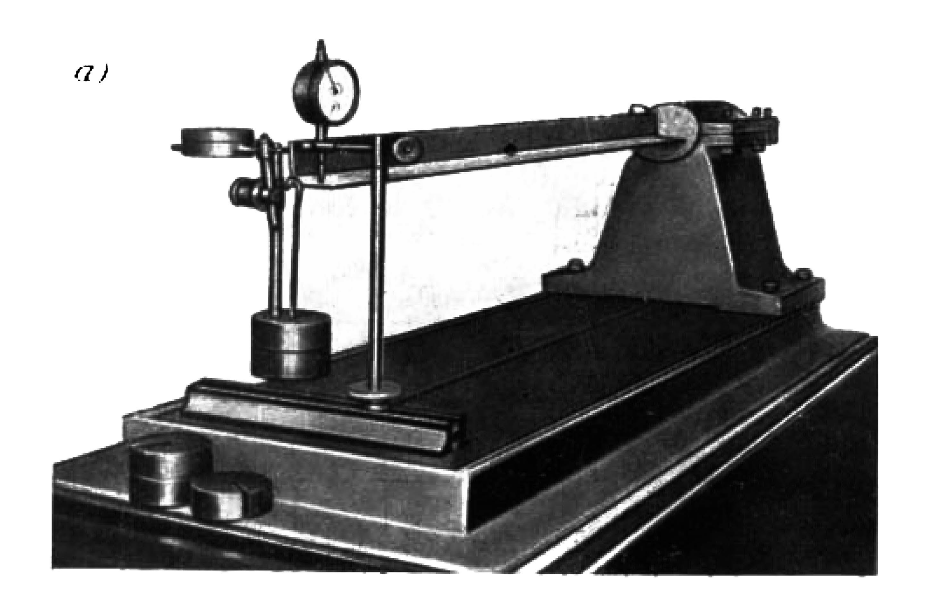
EXPERIMENTO 16. FLEXIÓN DESVIADA

1. Datos generales. El propósito del experimento es conocer la flexión desviada de una barra en voladizo y comparar los valores experimentales de la flecha y las tensiones con los teóricos.

En la flexión desviada de la barra, cuando el plano de acción de las fuerzas exteriores no coincide con ninguno de los dos planos principales de la barra, la dirección de la flexión no coincide con el plano de acción de las fuerzas exteriores.

La barra sobre la cual se realiza el experimento es un angular de alas iguales empotrado con un extremo (fig. 54, *a* y *b*). El empotramiento del voladizo puede ser realizado mediante dos cilindros, uno de los cuales, el exterior, está fijado inmóvilmente y el otro abraza bien el extremo de la barra. Girando el cilindro interior, se puede poner el voladizo en cualquier posición respecto a la dirección de la carga de flexión.

En la fig. 54 se muestra el caso de carga del voladizo con la fuerza vertical P, cuando la dirección de su acción forma con los planos principales de la barra un ángulo $\alpha_0 = 45°$. Las componentes P_x y P_y (fig. 54, *c*) de la fuerza P por los ejes principales de inercia x e y de la sección son idénticas e iguales a $P/\sqrt{2}$. Pero los momentos de inercia J_x y J_y no son iguales uno al otro. Las componentes de la flecha por los ejes x e y en el extremo del voladizo son $v_x = P_x l^3/3EJ_y$, $v_y = P_x l^3/3EJ_y$.



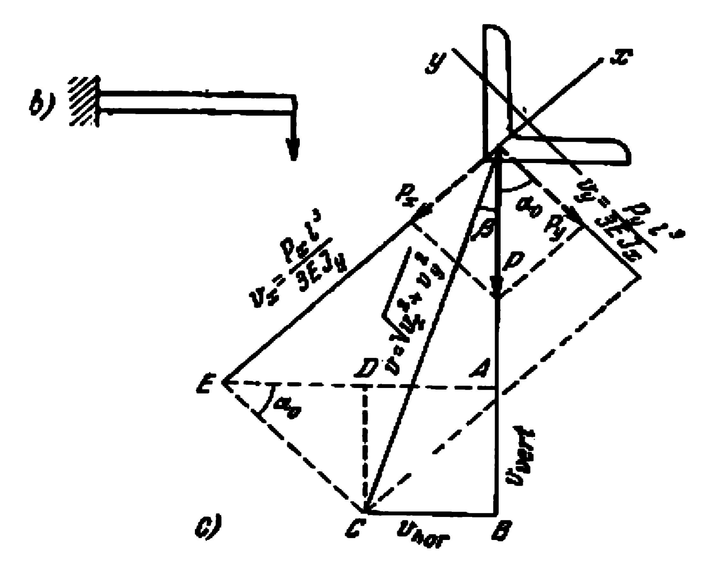


Fig. 54 | Flexión desviada del angular de alas iguales originada por una fuerza vertical: *a*) aspecto general de la instalación de ensayo; *b*, vista lateral; *c*, vista por el tope y el esquema de desplazamientos. La fuerza vertical P provoca la flecha desviada v.

De ahí, las componentes vertical y horizontal de la flecha son

$$\left.\begin{aligned} v_{vert} &= OA + AB = v_x \cos\alpha_0 + v_y \,\mathrm{sen}\,\alpha_0 = \frac{Pl^3}{6E}\left(\frac{1}{J_x} + \frac{1}{J_y}\right), \\ v_{hor} &= AE - ED = v_x \,\mathrm{sen}\,\alpha_0 - v_y \cos\alpha_0 = \frac{Pl^3}{6E}\left(\frac{1}{J_x} - \frac{1}{J_x}\right). \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

La tangente del ángulo β que determina la dirección de la flecha es igual a la relación de v_{hor}/v_{vert}. Por lo tanto,

$$\beta = \mathrm{arctg}\,\frac{v_{hor}}{v_{vert}}. \quad (29)$$

Del experimento se puede obtener con medición directa los valores de v_{vert} y v_{hor} y luego el valor del ángulo β. Se deben comparar estos valores con sus magnitudes teóricas.

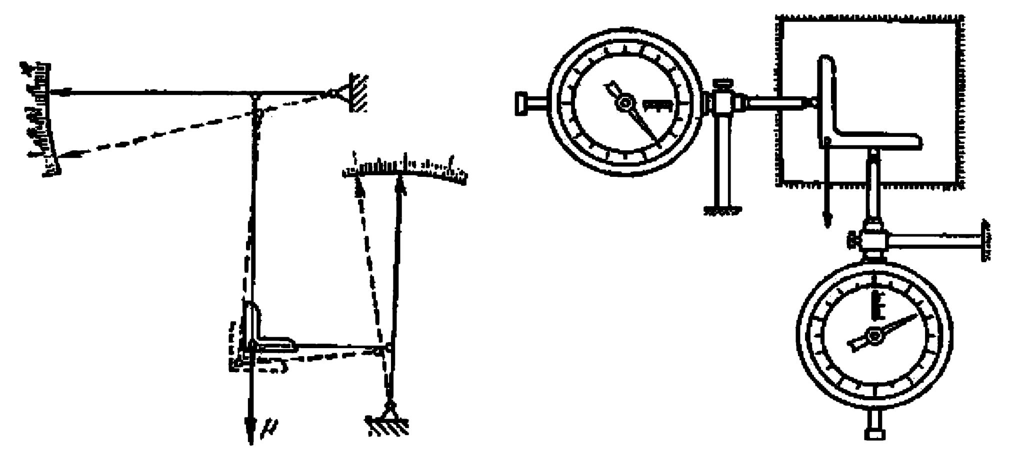


Fig. 55 | Esquema del catetómetro de aguja.

Fig. 56 | Catetómetro formado por los indicadores.

Durante el ensayo a la flexión desviada de la barra de sección angular hay que tener en cuenta que el centro de flexión de dicha barra no coincide con el centro de gravedad de la sección. Por eso, para excluir la influencia de la torsión, se debe aplicar la carga en el centro de flexión o medir los desplazamientos v_{vert} y v_{hor} para el centro de flexión que en el caso examinado se encuentra en el punto de intersección de los ejes de las alas del angular.

2. Determinación de los desplazamientos. Para la medición de las componentes horizontal y vertical de la flecha se utilizan los instrumentos llamados catetómetros. En la fig. 55 se presenta el catetómetro de palanca o de aguja. El aumento del instrumento

puede variar según el modo de instalación de las agujas. Existen también catetómetros de otros tipos.

A veces, cuando los desplazamientos son pequeños, dos indicadores instalados en dirección vertical y horizontal, como se muestra en la fig. 56, pueden hacer las veces de catetómetro. En caso de una viga de rigidez pequeña, la fuerza de empuje del muelle del indicador puede alterar el valor de la flecha.

Cargando el voladizo con cargas iguales consecutivas y fijando las flechas obtenidas, es posible seguir la dependencia lineal entre la flecha y la carga.

El registro de las observaciones durante el ensayo a la flexión desviada se realiza según la forma indicada en la tabla 31.

Multiplicando los incrementos medios de las lecturas Δn^m_{vert} y Δn^m_{hor} por los valores de una división c_{vert} y c_{hor} del catetómetro por la vertical y la horizontal, obtendremos los incrementos de las flechas $\Delta v_{vert} = \Delta n^m_{vert} c_{vert}$ y $\Delta v_{hor} = \Delta n^m_{hor} c_{hor}$ en las direcciones vertical y horizontal que corresponden al incremento de la carga ΔP. Al determinar teóricamente estos mismos valores por medio de las fórmulas (28), se debe poner ΔP en vez de P.

Tabla 31

Carga, P	Desplazamiento vertical		Desplazamiento horizontal	
	Lectura n_{vert}	Incremento de la lectura Δn_{vert}	Lectura n_{hor}	Incremento de la lectura Δn_{hor}

El ángulo β entre las direcciones de la flecha y la fuerza P se calcula por la fórmula (29) usando las magnitudes medidas de Δv_{hor} y Δv_{vert}.

3. **Determinación de las tensiones.** La línea neutra en la sección de la viga es perpendicular a la dirección de la flecha y pasa por el centro de gravedad de la sección. Tracemos la línea neutra (fig. 57). Ahora se puede construir el gráfico de las tensiones normales σ por el borde ABC de la sección. La escala de este diagrama todavía sigue siendo indeterminada.

Teóricamente, las tensiones normales en la flexión desviada son las siguientes:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x, \qquad (30)$$

donde M_x y M_y son los momentos flectores en los planos y y x.

En nuestro caso M_x y M_y son los mismos e iguales a $Pz/\sqrt{2}$, siendo z la distancia hasta la sección examinada.

Para el punto B $y = 0$ y, por tanto, tenemos de la fórmula (30):

$$\sigma_B = \frac{M_y}{I_y} x_B = \frac{Pz}{\sqrt{2}\, I_y} x_B.$$

Al calcular σ_B, determinamos con esto la escala del gráfico de σ y, por tanto, podemos determinar cualquier valor de σ del

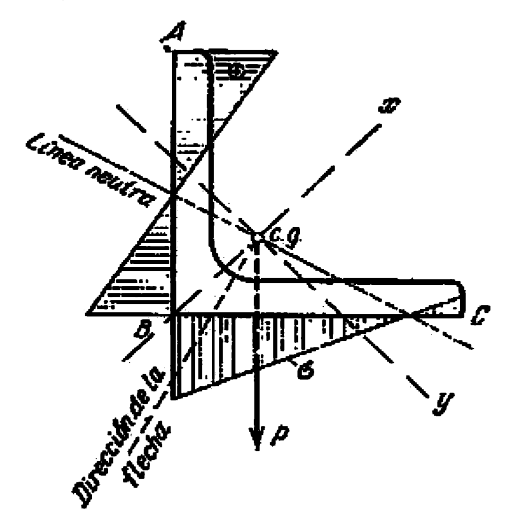


Fig. 57 | Gráfico de las tensiones normales σ por el borde ABC de la sección del angular (sombreado). La línea neutra es perpendicular a la dirección de la flecha; c. g. centro de gravedad de la sección.

Tabla 32

Extensómetro			Lecturas de extensómetros		Incrementos de las lecturas $\Delta n = n_2 - n_1$	Base del extensómetro s	$\beta = \frac{E}{Ks}$	Incrementos de la tensión $\sigma = \Delta n \beta$
Ubicación	№ fabril	Aumento K	n_1 (para la carga P_1)	n_2 (para la carga P_2)				
A								
B								
C								

gráfico, por ejemplo, en los puntos *A* y *C*. Colocando los extensómetros en los puntos *A*, *B* y *C*, podemos hallar las mismas tensiones experimentalmente. Se realiza el registro de los resultados del experimento según la forma expuesta en la tabla 32.

Comparamos las tensiones obtenidas con las calculadas por la fórmula teórica (30).

EXPERIMENTO 17. DISTRIBUCIÓN DE LAS TENSIONES NORMALES EN LA SECCIÓN DE UNA BARRA CURVA SOMETIDA A FLEXIÓN

1. Datos generales. El trabajo consiste en determinar experimentalmente mediante captadores eléctricos de resistencia la ley de distribución de las tensiones normales en la sección de la barra

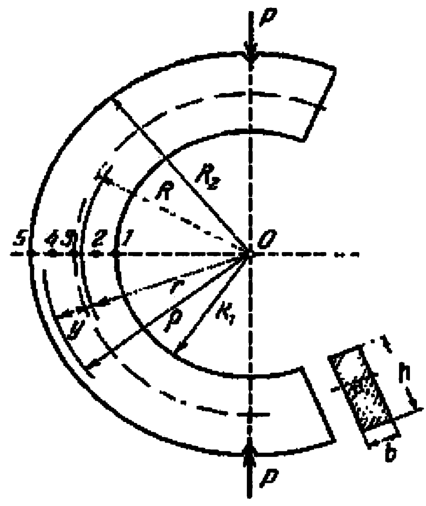


Fig. 58 | Compresión de la barra curva.

curva sometida a flexión. Para el ensayo se necesita una barra curva de forma circular de sección transversal rectangular.

Al comprimir la barra curva con una fuerza *P* aplicada a lo largo del eje vertical que pasa por el centro de curvatura (fig. 58), en su sección peligrosa *1—5* surgen la fuerza longitudinal $N = P$ y el momento flector $M = PR$. Las tensiones normales varían en la sección de la barra curva según una ley hiperbólica [1]:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{S}\frac{y}{\rho}, \tag{31}$$

donde:

$F = bh$ es el área de la sección transversal;

---

[1]) También es posible utilizar fórmulas de otro tipo.

$S = F(R - r)$ es el momento estático del área de la sección respecto al eje neutro;

y es la distancia desde el eje neutro hasta la fibra examinada;

$\rho = r + y$ es el radio de la fibra examinada (distancia desde el centro de curvatura de la barra);

$r = \frac{h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ es el radio de la capa neutra en la flexión pura;

$R = \frac{R_1 + R_2}{2}$ es el radio del eje central de la barra;

R_1 y R_2 son los radios interior y exterior de la barra (fig. 58).

2. Realización del ensayo e interpretación de los resultados. Antes de empezar el ensayo, para aclarar la ley de distribución de las tensiones normales de la barra curva, en cinco puntos de la superficie lateral de su sección peligrosa se pegan de antemano los captadores eléctricos de resistencia (experimento 28) y la barra se sujeta en una máquina de ensayo que funciona a compresión. Los captadores eléctricos se conectan a un instrumento especial para medir las deformaciones que tiene el valor de una división de su escala igual a k.

La barra curva, preparada de tal manera, se carga con fuerzas sucesivamente crecientes $P_1, P_2, \ldots, P_i$ que tienen un incremento igual de la carga: $\Delta P = P_{i+1} - P_i$.

Las fibras interiores de la barra se comprimen, mientras que las exteriores se traccionan. Junto con las fibras se varía la longitud del hilo de los captadores eléctricos y su resistencia eléctrica, lo que fija el instrumento cuya aguja se desplaza proporcionalmente a la deformación de las fibras. En la escala del instrumento se toman las lecturas para los escalones consecutivos de carga para todos los cinco puntos estudiados de la sección. Luego se determinan para estos puntos las diferencias entre cada dos lecturas consecutivas, es decir,

$$\Delta n_{i,\,i+1} = n_{i+1} - n_i$$

y se calculan las diferencias medias Δn de todas las mediciones. Multiplicando las diferencias medias por el valor de una división k y por el módulo de elasticidad E, se obtiene para cada punto de la sección por separado el incremento medio de la tensión [1])

$$\Delta\sigma = Ek\,\Delta n$$

que corresponde al incremento de la carga ΔP.

A base de los valores obtenidos se construye el gráfico de distribución de las tensiones normales en la sección de la barra

---

[1]) Consideramos que el estado de tensión, igual que en el caso de la deducción de la fórmula (31), es lineal.

Tabla 33

№ del captador eléctrico	Carga, kgf				Diferencia de las lecturas			Diferencia media de las lecturas, Δn	$\beta = Ek$	Incremento medio de la tensión $\Delta\sigma = \beta\Delta n$
	$P_1 =$	$P_2 =$	$P_3 =$	$P_4 =$						
	lecturas									
	n_1	n_2	n_3	n_4	$\Delta n_{1,2}$	$\Delta n_{2,3}$	$\Delta n_{3,4}$			
1										
2										
3										
4										
5										

curva, comparándolo con el gráfico obtenido a partir de los cálculos teóricos.

Los resultados del ensayo se anotan en el registro de laboratorio según la forma indicada en la tabla 33. También es posible utilizar el método gráfico de interpretación de los resultados del ensayo, teniendo en cuenta la observación en la nota de la pág. 27.

EXPERIMENTO 18. DETERMINACION DE LAS TENSIONES PRINCIPALES DURANTE LA FLEXION Y LA TORSIÓN DEL TUBO

1. Datos generales. El propósito del trabajo consiste en comprobar por vía experimental mediante extensómetros eléctricos los valores y direcciones de las tensiones normales principales en la capa superficial del tubo de paredes delgadas durante la flexión y torsión combinadas.

El experimento se realiza en una instalación especial de mesa (véase la pág. 307). Un tubo de duraluminio de paredes delgadas, empotrado por un extremo (fig. 59), se carga en el extremo libre con dos pesos P_d y P_i de distintas magnitudes. Los pesos están aplicados a distancias a_1 y a_2 del eje del tubo y crean momentos de flexión y de torsión en las secciones transversales. En la capa superficial del tubo surge el estado de tensión plano porque la superficie exterior del tubo se halla libre de las tensiones y una de las tensiones principales (perpendicular a la superficie exterior) es igual a cero. La proporción entre las tensiones principales depende de la relación entre los momentos de flexión y de torsión.

En la sección transversal del tubo a una distancia a_3 de su extremo se elige el punto *m* más alejado de la capa neutra. En este punto en las secciones transversales del tubo surgen las tensiones normales de flexión y las tensiones tangenciales de torsión

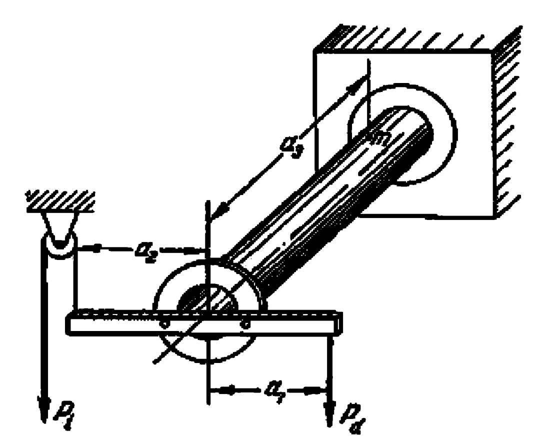


Fig. 59 | Ensayo del tubo de paredes delgadas a flexión y torsión.

(fig. 60). Las tensiones tangenciales de flexión aquí son iguales a cero. En las secciones longitudinales, de acuerdo con la ley de

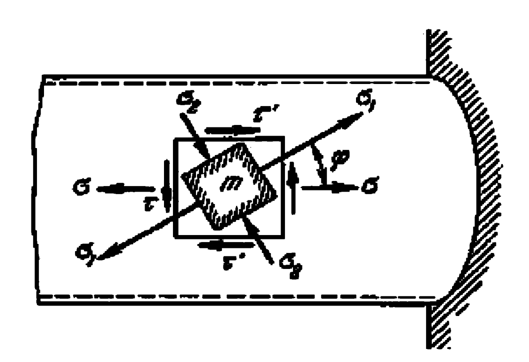


Fig. 60 | Estado tensional en un punto arbitrario *m* del tubo de paredes delgadas.

reciprocidad, surgen tensiones tangenciales iguales a las de secciones transversales. En las secciones longitudinales las tensiones normales son iguales a cero.

La dirección de las tensiones principales de la capa superficial no se conoce de antemano y depende de la proporción entre los momentos de flexión y de torsión. Para determinar en forma experimental las magnitudes de ambas tensiones principales y su

dirección basta con medir, como se muestra más adelante, los alargamientos de la capa superficial en tres direcciones arbitrarias. Es cómodo efectuar las mediciones con extensómetros eléctricos (véase el experimento 30). En el punto m sobre la superficie del tubo se pega la llamada roseta de tres captadores de resistencia (fig. 61). Los ejes x e y de dos captadores se eligen mutuamente perpendiculares, mientras que el eje u del tercero está inclinado en un ángulo de 45° respecto a los dos primeros. Estos ejes se llaman ejes de la roseta. La orientación de la roseta sobre el

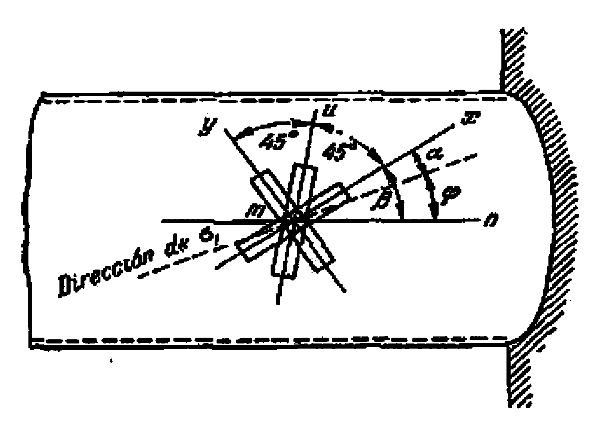


Fig. 61 | Roseta de tres captadores de hilo de resistencia.

tubo se determina por el ángulo β entre el eje x y la generatriz mn paralela al eje del tubo.

2. Determinación de las tensiones principales del experimento. Mostremos que los alargamientos medidos en el sentido de los ejes de la roseta pueden expresarse por medio de los alargamientos según las direcciones principales. Por ejemplo, en la dirección del eje x —según la ley de Hooke para el estado de tensión plano— el alargamiento es igual a

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y).$$

Sustituyendo aquí los valores de σ_x y σ_y expresados por medio de las tensiones principales σ_1 y σ_2, y el ángulo α medido desde la dirección de σ_1 hasta el eje x, tenemos:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cos 2\alpha - \mu\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2} + \mu\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cos 2\alpha\right)$$

o

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\frac{\sigma_1-\mu\sigma_2+\sigma_2-\mu\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_1-\mu\sigma_2-\sigma_2+\mu\sigma_1}{2}\cos 2\alpha\right).$$

De aquí, tomando en consideración que

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{E}(\sigma_1-\mu\sigma_2)&=\varepsilon_1\\ \frac{1}{E}(\sigma_2-\mu\sigma_1)&=\varepsilon_2,\end{aligned}\right\}\qquad(32)$$

y

obtenemos la expresión para ε_x [véase la fórmula (33)].

Para componer las fórmulas analíticas de ε_y y ε_u, es necesario sustituir α en la expresión para ε_x por los ángulos respectivos $\alpha+90°$ y $\alpha+45°$ medidos desde σ_1 hasta los ejes y y u, y tener en cuenta que $\cos 2(\alpha+90°)=-\cos 2\alpha$ y $\cos 2(\alpha+45°)=$ $=-\text{sen}\, 2\alpha$. De esta manera, se puede representar los alargamientos según los ejes de la roseta en la forma

$$\varepsilon_x=\frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2}+\frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{2}\cos 2\alpha;\qquad(33)$$

$$\varepsilon_y=\frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2}-\frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{2}\cos 2\alpha;\qquad(34)$$

$$\varepsilon_u=\frac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{2}-\frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{2}\,\text{sen}\, 2\alpha.\qquad(35)$$

Solucionamos las escuaciones (33)—(35) respecto a los alargamientos principales ε_1 y ε_2 y el ángulo α en el siguiente orden:

Sumamos miembro por miembro las ecuaciones (33) y (34). La igualdad obtenida

$$\varepsilon_1+\varepsilon_2=\varepsilon_x+\varepsilon_y\qquad(36)$$

la utilizamos para la transformación de la ecuación (35) y luego restamos miembro a miembro la ecuación (34) de la ecuación (33). Como resultado de la transformación obtenemos:

$$\left.\begin{aligned}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\,\text{sen}\, 2\alpha&=\varepsilon_x+\varepsilon_y-2\varepsilon_u;\\ (\varepsilon_1-\varepsilon_2)\cos 2\alpha&=\varepsilon_x-\varepsilon_y.\end{aligned}\right\}\qquad(37)$$

Para excluir el ángulo α, elevamos ambas ecuaciones (37) al cuadrado, las sumamos y sacamos raíces de las dos partes de la igualdad obtenida. Entonces,

$$\varepsilon_1-\varepsilon_2=\sqrt{(\varepsilon_x+\varepsilon_y-2\varepsilon_u)^2+(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2};$$

teniendo en cuenta la dependencia (36) y abriendo los paréntesis bajo la raíz de la última igualdad, expresamos los alargamientos según las direcciones principales en dependencia de los alargamientos medidos por los ejes de la roseta:

$$\varepsilon_{1,2}=\frac{\varepsilon_x-\varepsilon_y}{2}\pm\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_u)^2+(\varepsilon_y-\varepsilon_u)^2}.\qquad(38)$$

Calculamos las tensiones principales, determinadas por los datos experimentales, de acuerdo a las fórmulas que resultan de

las relaciones (32) en la forma siguiente:

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1+\mu\varepsilon_2)\\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2+\mu\varepsilon_1).\end{aligned}\right\} \quad (39)$$

y

La dirección de los planos principales se determina por el ángulo α, para el cual hallamos de las ecuaciones (37):

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y-2\varepsilon_u}{\varepsilon_x-\varepsilon_y},$$

o bien

$$\alpha = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y-2\varepsilon_u}{\varepsilon_x-\varepsilon_y}. \quad (40)$$

El ángulo entre las perpendiculares a la sección transversal y al plano principal con la tensión σ_1 es igual a (fig. 61):

$$\varphi = \beta - \alpha.$$

3. Cálculo teórico de las tensiones principales. Los valores de las tensiones principales y del ángulo de inclinación de los planos principales hallados durante el experimento, deben compararse con los resultados del cálculo teórico.

Al cargar el tubo (fig. 59), en la sección estudiada surgen los momentos:

de torsión $M_t = P_d a_1 - P_i a_2$

y

de flexión $M_f = (P_d - P_i) a_3$.

Las tensiones correspondientes en el punto m son:

$$\tau = \frac{M_t}{W_p} \quad \text{y} \quad \sigma = \frac{M_f}{W},$$

donde: $W_p = \frac{\pi D^3}{16}\left(1-\frac{d^4}{D^4}\right)$ es el módulo de sección torsional del tubo;

$W = \frac{1}{2} W_p$ es el módulo de la sección;

D y d son los diámetros exterior e interior del tubo.

En las secciones longitudinales surgen solamente las tensiones tangenciales $\tau' = -\tau$ (fig. 60). Para el estado de tensión plano dado las tensiones principales se calculan a partir de las fórmulas siguientes:

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\sigma}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{\sigma^2+4\tau^2};\\ \sigma_2 &= \frac{\sigma}{2}-\frac{1}{2}\sqrt{\sigma^2+4\tau^2}.\end{aligned}\right\} \quad (41)$$

La posición de los planos principales se determina por el ángulo φ entre la dirección de σ_1 y la generatriz del tubo; este ángulo se calcula por la fórmula

$$\operatorname{tg} 2\varphi = -\frac{2\tau}{\sigma}.$$

La dirección positiva del ángulo φ se cuenta desde la dirección de σ_1 en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

4. Realización del ensayo. Antes de iniciar el ensayo, se determinan las características elásticas del material del tubo, se comprueban sus dimensiones, los brazos de los pesos, el funcionamiento de los captadores eléctricos y del galvanómetro portátil de espejo (véase el § 33). Hay que tener en cuenta la gran sensibilidad de los captadores eléctricos que reaccionan incluso al menor cambio de la temperatura de los objetos circundantes. Por eso es necesario efectuar el ensayo a temperatura constante.

Al conectar consecutivamente en el circuito los tres captadores de la roseta, las primeras lecturas n_{x1}, n_{u1} y n_{v1} se toman en la escala del galvanómetro sin cargar el tubo, es decir, cuando $P_d = 0$ y $P_t = 0$. Las lecturas en la escala derecha (roja), a partir de cero, corresponden al alargamiento y se toman con el signo "más"; en la escala izquierda (negra), corresponden al acortamiento y se toman con el signo "menos".

Luego se suspenden del tubo los pesos P_d y P_t, siendo $P_d > P_t$, y de nuevo se toman las lecturas n_2, conectando consecutivamente todos los captadores. De la misma manera se toman las lecturas n_3 con los pesos $2P_d$ y $2P_t$. Después se determinan los incrementos de las lecturas $\Delta n = n_{i+1} - n_i$ y de ahí se calcula el valor medio Δn_m que corresponde a los incrementos de los pesos $\Delta P = P_{i+1} - P_i$. Conociendo el valor de una división c de la escala del galvanómetro que se determina con anticipación durante la calibración del instrumento, es fácil obtener incrementos medios de los alargamientos $\Delta\varepsilon$ en el sentido de cada captador de la roseta, pegado en el punto m, por la fórmula siguiente:

$$\Delta\varepsilon = \Delta n_m c.$$

Los resultados del experimento se anotan de acuerdo con la forma expuesta en la tabla 34.

Los alargamientos $\Delta\varepsilon$ hallados por las direcciones determinadas x, u e v de la roseta se sustituyen en las fórmulas (38) y (40), a partir de las cuales se calculan los incrementos de los alargamientos principales $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_2$ y el ángulo α de inclinación del plano principal. Después, por las fórmulas (39), se calculan los incrementos $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_2$ de las tensiones principales causadas por el incremento ΔP de la carga. Luego los valores de $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_2$ se comparan con los resultados del cálculo teórico.

Tabla 34

Carga, kgf		$P_d =$				$\Delta P_d =$	$\Delta\varepsilon =$
		$P_l =$				$\Delta P_l =$	$= \Delta n_{m\varepsilon}$
Lecturas de los captadores eléctricos	por el eje x	n_x				$\Delta n_{x,\,m} =$	
		Δn_x					
	por el eje u	n_u				$\Delta n_{u,\,m} =$	
		Δn_u					
	por el eje y	n_y				$\Delta n_{y,\,m} =$	
		Δn_y					

EXPERIMENTO 19. TORSION RESTRINGIDA

1. Datos generales. El propósito del experimento consiste en familiarizarse con la torsión restringida de barras de paredes delgadas de sección abierta. Con este fin hay que determinar experimentalmente lo siguiente: 1) tensiones en el plano del empotramiento de un voladizo de paredes delgadas cargado con momento torsional en el extremo y 2) ángulo de torsión. Comparar los valores obtenidos con sus magnitudes teóricas.

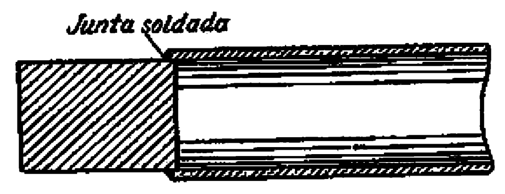


Fig. 62 | Empotramiento del tubo de paredes delgadas.

2. Instalación de ensayo. El experimento puede ser efectuado en la misma instalación que se utiliza para la determinación experimental del centro de flexión (véase el experimento 15). Sin embargo, en este caso es de suma importancia la rigidez del empotramiento; por eso el voladizo será soldado a una pieza rígida.

En la fig. 62 se muestra el empotramiento del tubo circular con una ranura longitudinal en una base rígida en forma de barra maciza o tubo de paredes gruesas. Luego la base rígida puede sujetarse a una pared o columna de modo que garantice el soporte del momento torsional.

Para el ensayo de torsión restringida es cómoda la instalación simétrica mostrada en la fig. 63. Los topes de la barra están sujetados inmóvilmente en sus planos, pero su deplanación no es

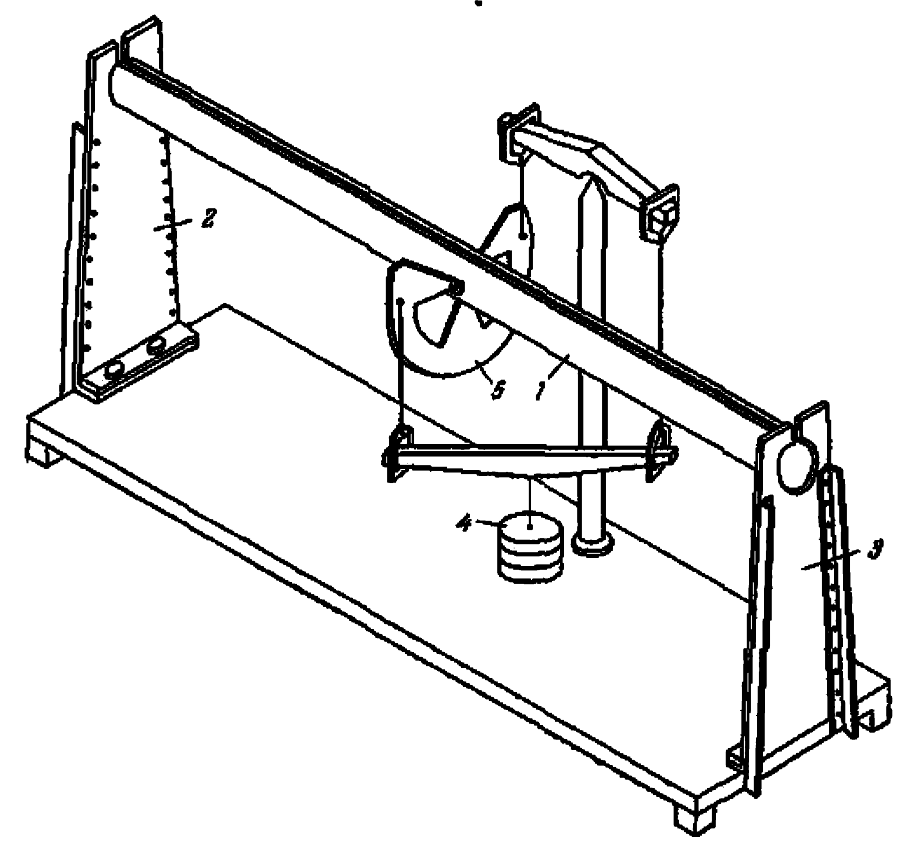


Fig. 63 Ensayo del perfil de paredes delgadas a torsión restringida: *1*, perfil ensayado; *2* y *3*, apoyos; *4*, pesos que por medio de un sistema de palancas provocan la torsión de la probeta; *5*, plancha que transmite el momento de torsión sobre la probeta (se reservan los vanos para colocar los extensómetros).

restringida. La barra se carga con el momento torsional por medio de una plancha ubicada en el plano de simetría de la instalación. La plancha se remacha a la barra. La carga se efectúa con un peso por medio de balancines, como se muestra en la fig. 63.

La longitud de cálculo de la barra tiene que superar unas cuantas veces la altura de su sección. En el caso de una barra corta las fórmulas expuestas más adelante, basadas en la teoría de deplanación, son insuficientes y tienen que ser ampliadas con

los parámetros que tomen en cuenta la deformación de desplazamiento.

3. Instrumentos de medición. La medición del momento torsional no es difícil porque el momento se crea con carga directa.

Las tensiones se determinan mediante la medición de los alargamientos con extensómetros de cualquier sistema. Para dicha medición son cómodos los captadores de resistencia. En el caso

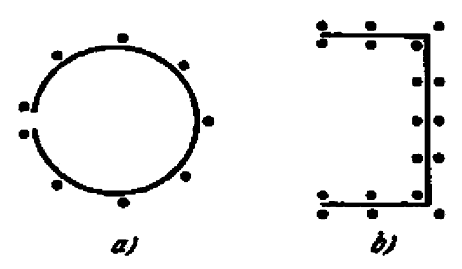


Fig. 64 | Colocación de los extensómetros en la sección que se ensaya a torsión restringida.

de una instalación de ensayo simétrica, los extensómetros se instalarán en el plano de su simetría. En el caso de una instalación de ensayo de voladizo, los extensómetros se instalan cerca del empotramiento. La situación de los extensómetros en la sección transversal de la barra se ilustra en la fig. 64. Todos los extensómetros van dirigidos a lo largo de la barra. La forma del registro de laboratorio se presenta en la tabla 35.

Tabla 35

Base del extensómetro $s =$ Módulo de elasticidad $E =$

No del extensómetro	Aumento del extensómetro K	Lecturas del extensómetro		Diferencia de las lecturas del extensómetro $\Delta n = n_2 - n_1$	Incremento de la tensión $\Delta\sigma = \Delta n \frac{E}{Ks}$
		cuando $M_t =$	cuando $M_t =$		
		n_1	n_2		

Para medir los ángulos de torsión se utilizan torsiómetros descritos en el experimento sobre la torsión de barras redondas.

4. Fórmulas teóricas. Los valores experimentales de las tensiones y del ángulo de torsión deben compararse con los teóricos,

Para la barra de una longitud considerable son válidas las siguientes fórmulas de la teoría de deplanación [1]:

La tensión normal en la sección transversal de la barra es

$$\sigma = \frac{B}{J_\omega}\omega. \tag{42}$$

El ángulo de torsión del voladizo cargado en el extremo con el momento L es

$$\varphi = \frac{Ll^3}{3EJ_\omega}. \tag{43}$$

En estas fórmulas:

B es así llamado bimomento, igual para el caso examinado a Ll;

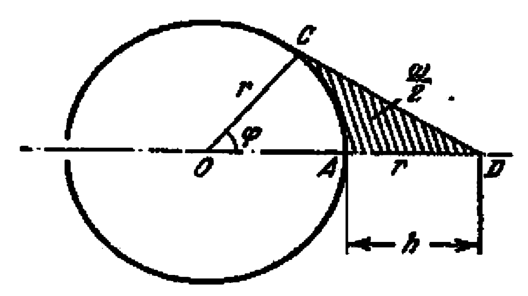


Fig. 65 | Tensión σ de la torsión restringida es proporcional al área (sombreada) entre el eje de simetría del perfil y el radio vector móvil que tiene origen en el centro de flexión D.

$J\omega$ es el momento sectorial de inercia de la sección transversal de la barra que puede ser determinado según la forma de la sección,

$$J_\omega = \int_F \omega^2 dF;$$

ω es el área sectorial doble del contorno trazada por el radio vector que sale del centro de flexión del perfil; la magnitud de ω se cuenta a partir del eje de simetría.

Para la sección circular con una ranura (fig. 64, *a*) fue hallada la posición del centro de flexión (experimento 15). La magnitud corriente de ω (en la fig. 65 está sombreada el área igual a $\omega/2$) puede ser expresada del modo siguiente:

$$\omega = \left(\frac{1}{2}\cdot 2r\cdot r\operatorname{sen}\varphi - \frac{r^2\varphi}{2}\right)2.$$

---

[1] Véase *V. Z. Vlásov*, Barras elásticas de paredes delgadas, Stroizdat, 1959.

En esta fórmula el primer término entre paréntesis es el área del triángulo ODC, el segundo es el área del sector OAC.

Simplificando obtenemos:

$$\omega = r^2 (2 \operatorname{sen} \varphi - \varphi). \tag{44}$$

Luego hallamos que

$$J_\omega = \int_F \omega^2 \, dF = 2 \int_0^\pi [r^2 (2 \operatorname{sen} \varphi - \varphi)]^2 tr \, d\varphi =$$

$$= 2\pi \left(\frac{\pi^2}{2} - 2 \right) tr^5 = 8{,}1 \, tr^5.$$

El gráfico de ω, construido a base de la ecuación (44), se da en la fig. 66. El mismo aspecto tiene también el gráfico de σ, porque

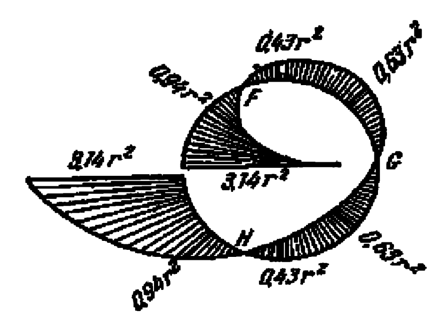


Fig. 66 | Gráfico de las áreas sectoriales dobles ω que son proporcionales a las tensiones σ de la torsión restringida.

la tensión es proporcional al área sectorial ω [véase la fórmula (42)].

La tensión máxima es

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{B}{J_\omega} \omega_{\text{máx}} = \frac{Ll}{8{,}1 tr^5} 3{,}14 r^2 = 0{,}386 \frac{Ll}{tr^3}.$$

Cuando $l = 50$ cm, $t = 1$ mm, $r = 2{,}5$ cm, $L = 50$ kgfcm hallamos $\sigma_{\text{máx}} = 620$ kgf/cm^2 y de la fórmula (43) para $E = 2 \cdot 10^6$ kgf/cm^2 tenemos $\varphi = 0{,}0132 = 0{,}76°$.

Para el perfil en U (fig. 67, a):

$$J_\omega = \frac{h^2 d^2}{12} \left[h t_h + 2 \, d t_b + \frac{2 (b - d)^3}{d^2} t_b \right],$$

donde $d = \frac{b^2 h^2 t_b}{4 J_x}$ es la distancia del centro de flexión desde el alma del perfil en U, siendo $J_x = \frac{h^2}{12} (t_h h + 6 b t_b)$ el momento de inercia de la sección del perfil en U respecto al eje de simetría.

Supongamos que $t_b = t_h = t = 0{,}05\,b = 0{,}025\,h$, entonces $d = 0{,}375\,b$, $J_\omega = 0{,}0146\,b^6$.

El gráfico de ω para el perfil en U tiene el aspecto mostrado en la fig. 67, *b*. El mismo aspecto tiene el gráfico de las tensiones normales en la torsión restringida. Las tensiones máximas tienen lugar en los bordes libres del perfil en U. Para $L = 150$ kgfcm, $l = 50$ cm, $b = 5$ cm y $E = 2\cdot10^6$ kgf/cm² obtendremos lo siguiente:

$$\sigma_{máx} = \frac{B}{J_\omega}\omega_{máx} = \frac{150\cdot50}{0{,}0146\cdot5^6}\,0{,}625\cdot5^2 =$$

$$= 485\ \text{kgf/cm}^2,\quad \varphi = 0{,}0137 = 0{,}78°.$$

Los puntos cero en los gráficos de ω (fig. 66 y 67, *b*) sirven para la sujeción de la plancha, porque los agujeros para re-

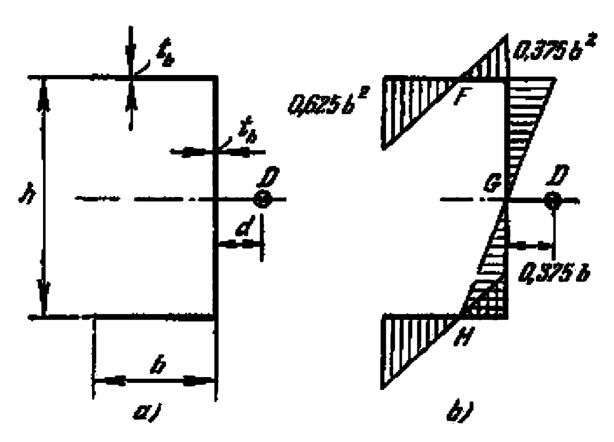


Fig. 67 | Sobre la torsión restringida del perfil en U: *a*, esquema del perfil; *b*, gráfico de las áreas sectoriales dobles ω.

maches no debilitan en estos lugares la sección de la barra en la torsión restringida.

EXPERIMENTO 20. ACCIÓN DE LA CARGA DE IMPACTO SOBRE LA VIGA

1. Datos generales y teóricos. El propósito del experimento consiste en estudiar la acción del impacto flector. Hace falta determinar el coeficiente dinámico del impacto, la frecuencia de las oscilaciones naturales de la viga, el decremento logarítmico de amortiguamiento, y comparar los datos experimentales con los resultados del cálculo teórico.

En el instante del impacto del peso P que cae sobre la viga desde una altura h, la flecha dinámica máxima v_d, tomando en

consideración la masa de la viga, se determina por la fórmula:

$$v_d = v_{est} + \sqrt{v_{est}^2 + \frac{2hv_{est}}{1 + k_r \frac{Q}{P}}}.$$

El coeficiente dinámico es

$$\varkappa = \frac{v_d}{v_{est}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{v_{est}\left(1 + k_r \frac{Q}{P}\right)}} \qquad (45)$$

o bien

$$\varkappa = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{v'_{est}}},$$

donde v'_{est}, flecha estática producida por la carga y el peso reducido de la viga, es

$$v'_{est} = v_{est}\left(1 + k_r \frac{Q}{P}\right) = (P + k_r Q)\,\bar{v}; \qquad (46)$$

k_r es el coeficiente de reducción de la masa (para una viga simple con la carga en la mitad de la luz $k_r = 17/35$);

Q es el peso de la viga;

$\bar{v} = \frac{v_{est}}{P}$ es la flecha estática producida por el peso $P = 1$ kgf.

Una vez sucedido el impacto, empiezan las oscilaciones libres (naturales) de la viga y del peso, cuya frecuencia fundamental por segundo se determinará aproximadamente por medio de la fórmula

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{v'_{est}}}.$$

Las frecuencias naturales de los sistemas reales elásticos se amortiguan con gran rapidez. La velocidad de amortiguamiento de las oscilaciones depende de las fuerzas de resistencia del sistema; para una resistencia proporcional a la velocidad del movimiento se caracteriza por el decremento logarítmico de amortiguamiento d o por el coeficiente de amortiguamiento α. Se puede hallar el decremento logarítmico de amortiguamiento durante un período, midiendo los valores de dos amplitudes consecutivas obtenidos en el experimento:

$$d = \ln\frac{a_m}{a_{m-1}} = -\alpha T.$$

La determinación de d será más exacta si medimos las amplitudes dentro de m períodos de oscilaciones; entonces,

$$\ln\frac{a_m}{a_0} = -\alpha m T = md$$

o bien

$$d = \frac{1}{m} \ln \frac{a_m}{a_0}.$$

El coeficiente de amortiguamiento (de resistencia) será

$$\alpha = -\frac{d}{T}.$$

Contando con el amortiguamiento, la frecuencia circular de las oscilaciones naturales es

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2} = \sqrt{\frac{g}{v'_{est}} - \alpha^2},$$

y la frecuencia por segundo

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{v'_{est}} - \alpha^2}. \qquad (47)$$

2. Realización del experimento. En este experimento el estudio del impacto se efectúa sobre una viga de acero AB (fig. 68, *a*). A la superficie inferior de la viga, en medio de su luz, están pegados dos captadores eléctricos de resistencia D conectados en el puente de medición (fig. 68, *b*). Los captadores de compensación están pegados sobre un voladizo de duraluminio, mediante el cual se realiza el equilibrio del puente. Las señales pasan del puente de medición por el amplificador al que alimenta un rectificador de la corriente (fig. 68, *a*), a uno de los vibradores del oscilógrafo.

Antes del experimento, para determinar la escala, se realiza la calibración estática del oscilograma del modo siguiente:

Se conecta el oscilógrafo (la tapa interior del oscilógrafo МПО-2 (MPO-2) puede verse en la fig. 69); el caldeo del bombillo del oscilógrafo se lleva hasta 5 V, observados en el voltímetro V. A uno de los vibradores, por ejemplo, al vibrador № 8, se le conecta el puente de medición que se pone en el circuito del oscilógrafo con el interruptor *1* respectivamente. Al hacer esto, del vibrador № 8, en la pantalla *5* aparecerá un reflejo luminoso que se puede mover por la vertical (por el eje de las ordenadas), haciendo girar una de las manecillas *2* que corresponde al vibrador № 8. Se hace coincidir este reflejo con el de cualquier otro vibrador sin corriente. Ambos reflejos se proyectan en el centro de una película de cine lo que se controla sobre la pantalla *5*. Al conectar la exploración, ambos reflejos se pondrán en movimiento a lo largo del eje de las abcisas y dejarán en la película una recta.

En medio de la luz de la viga se aplica el peso $P = 1$ kgf y con el indicador *I* (fig. 68, *a*) se mide la flecha unitaria $\bar{v}$. De acuerdo con la flecha $\bar{v}$ se produce el alargamiento de los capta-

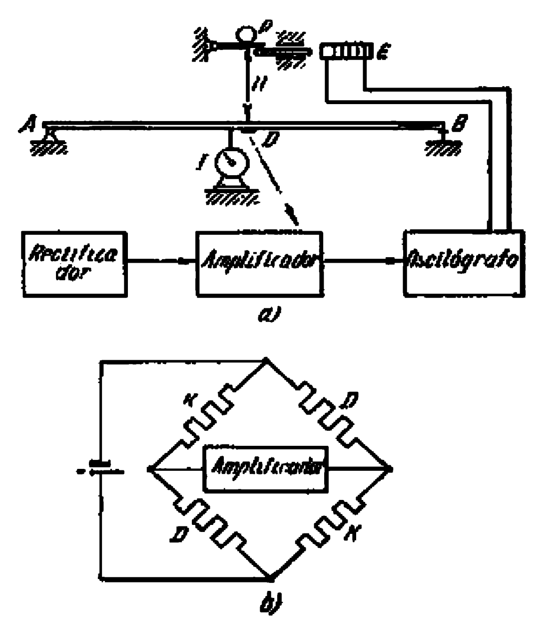


Fig. 68 | Acción de la carga de impacto sobre la viga: *a*, esquema de la viga; *b*, puente de medición.

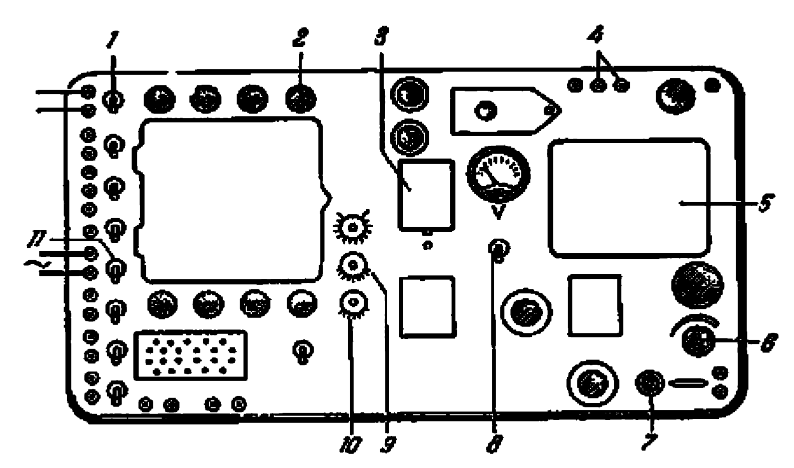


Fig. 69 | Tapa interior del oscilógrafo MPO-2 (МПО-2): *1*, interruptor para conectar el vibrador № 8; *2*, manecilla del vibrador № 8; *3*, carrete; *4*, bornes; *5*, pantalla; *6*, manecilla del caldeo; *7*, botón para enchufar la película; *8*, interruptor para conectar el motor; *9*, regulador de la longitud del cuadro; *10*, manecilla de la conección del electroimán; *11*, interruptor del vibrador № 4 (marcador de tiempo).

dores *D*, se cambia su resistencia que altera el equilibrio del puente, originando en el amplificador (fig. 68, *b*) una corriente que se dirige al vibrador № 8 y provoca el desplazamiento del reflejo por el eje de las ordenadas.

De esta manera, el reflejo del vibrador № 8 se alejará del reflejo del vibrador sin corriente, que permanece mientras tanto inmóvil, a una distancia de *a* mm por la vertical proporcional al valor de la flecha $\bar{v}$. Luego el regulador *9* (véase la fig. 69) de longitud del cuadro se pone en la división mínima (a eso de 10 mm), se conecta el contacto *8* del motor que gira la exploración y se realiza la toma de las fotografías oprimiendo el botón *7*. Los reflejos dejarán sobre la película dos rectas paralelas al eje de las abscisas. Midiendo la distancia $\bar{a}$ entre ellas, obtendremos el coeficiente de escala del oscilograma igual a

$$k=\frac{\bar{v}}{\bar{a}}.$$

Hecha la calibración, preparamos el oscilógrafo para obtener en la misma película el oscilograma del impacto. Dejando el reflejo del vibrador № 8 en medio de la película, desplazamos hacia el borde de la película el reflejo del marcador de tiempo. En calidad de tal se utiliza, por ejemplo, el vibrador № 4 que se conecta al circuito de corriente alterna mediante el interruptor *II* y vibra con una frecuencia $f_v = 50$ Hz. Ponemos el regulador *9* a una longitud del cuadro de alrededor de 200—300 mm y con la manecilla *10* ajustamos el contacto del electroimán *E* (fig. 68, *a*) de manera que se conecte, con un pequeño retraso después del inicio del movimiento de la película, y hale el pasador que sostiene el peso *P*. El electroimán *E* se conecta al oscilógrafo por medio de los bornes *4* (fig. 69).

Luego, conectando los interruptores *I*, *II* y *8* (del vibrador № 8, marcador de tiempo y motor), oprimimos el botón *7* y tomamos las fotos del oscilograma. Mantenemos oprimido el botón *7* hasta que cese el movimiento de la película que se para automáticamente al haber pasado el tramo indicado. Primeramente empieza el movimiento de la película, luego se conecta el electroimán *E* y el peso se deja caer sobre la viga.

Las oscilaciones de la viga, originadas por el impacto, se transmiten al vibrador № 8 y se fijan sobre la película. Cortamos la película expuesta y se la entregamos junto con el carrete al laboratorio de fotografía para que sea revelada.

3. Interpretación de los resultados del experimento. En el oscilograma revelado (fig. 70) se mide lo siguiente: la distancia $\bar{a}$ entre las rectas de calibración, la amplitud máxima $a_{máx}$ y dos amplitudes arbitrarias entre *m* períodos, por ejemplo, a_0 y a_m. Las amplitudes a_0 y $a_{máx}$ pueden coincidir. Es cómodo realizar la

medición de las amplitudes con un comparador u otro aparato de medición con lente de aumento.

La frecuencia f de oscilaciones de la viga se determina contando directamente el número de las oscilaciones por segundo, es decir, en el tramo $m_v = 50$ vibraciones del marcador de tiempo. Es conveniente elegir el inicio o el final de la cuenta a partir de la vertical, en la cual coinciden las crestas de las amplitudes de oscilación de la viga y del marcador de tiempo.

Si dentro de los límites del registro tiene lugar la coincidencia de las amplitudes en dos puntos, como se muestra en la fig. 70, entonces, contando entre estos puntos los valores de m y m_v de

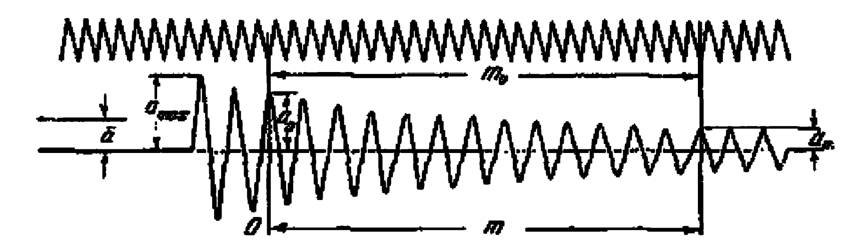


Fig. 70 | Aspecto del oscilograma cuando sobre la viga acciona la carga de impacto.

oscilaciones de la viga y del marcador de tiempo, hallamos la frecuencia f a partir de la relación

$$\frac{f}{f_v} = \frac{m}{m_v}.$$

Disponiendo de la flecha $\bar{v}$ obtenida en el indicador y, por consiguiente, la flecha estática $v_{est} = P\bar{v}$ de la carga (peso de la bolita), y conociendo los valores de $\bar{a}$, $a_{máx}$, a_0, a_m y f, obtenemos lo siguiente: la escala k del oscilograma, la flecha dinámica de la viga $v_{din} = ka_{máx}$, el coeficiente dinámico $\varkappa$, el decremento logarítmico de amortiguamiento $d = \frac{2,3}{m} \lg \frac{a_m}{a_0}$, el período de oscilaciones $T = 1/f$ y el coeficiente de amortiguamiento $\alpha = d/T$.

El coeficiente dinámico y la frecuencia de oscilaciones hallados de tal manera se comparan con sus magnitudes teóricas calculadas por las fórmulas (45) y (47) teniendo en cuenta el peso de la viga. Para determinar la flecha v'_{est} por la fórmula (46), se puede emplear la flecha $\bar{v}$ medida con el indicador o, sabiendo las dimensiones de la viga, determinarla teóricamente por la fórmula:

$$v'_{est} = \frac{(P + k_r Q) l^3}{48EI}.$$

Al calcular la magnitud teórica de la frecuencia f por la fórmula (47), se puede usar el coeficiente de amortiguamiento, obtenido por vía experimental.

EXPERIMENTO 21. OSCILACIONES DEL PESO SUSPENDIDO DE UN MUELLE

1. Datos generales. Para el trabajo docente sobre la determinación del período de oscilaciones de un sistema con un grado de libertad son cómodos los muelles elásticos. La frecuencia de oscilaciones de un peso suspendido del muelle (fig. 71) de una rigidez

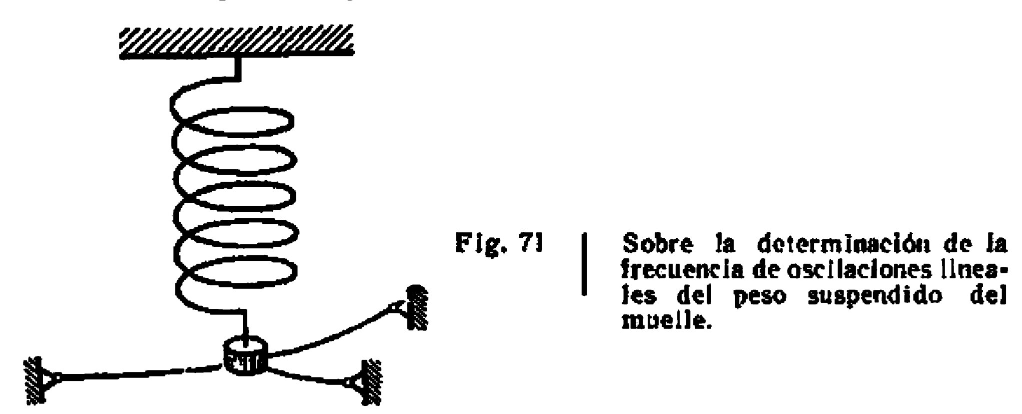


Fig. 71 | Sobre la determinación de la frecuencia de oscilaciones lineales del peso suspendido del muelle.

insignificante puede ser tan pequeña, que pueden contarse las oscilaciones directamente sin recurrir a ningún tipo de instrumento Por ejemplo, en el caso de un muelle de acero que tiene 10 espiras (fig. 71), diámetro $D = 10$ cm, diámetro del alambre 4 mm, y peso de 1 kgf, suspendido del muelle, hace alrededor de 2,5 oscilaciones por segundo. Las oscilaciones de tal frecuencia pueden ser contadas fácilmente en 30 ó 60 s mediante un reloj con segundero.

El propósito de dicho trabajo consiste en comprobar experimentalmente la posibilidad de emplear fórmulas teóricas para determinar la frecuencia de las oscilaciones propias de un peso puntual, sujetado elásticamente, con un grado de libertad en el caso de un peso real suspendido de un muelle helicoidal de pequeña rigidez. El estudiante debe medir por medio del cronómetro o reloj el período de las oscilaciones propias del peso y comparar el resultado con el teórico.

2. Realización del ensayo. El peso suspendido del muelle se sujeta con tres hilos ubicados en el plano horizontal, como aparece en la fig. 71. Dichos hilos, dispuestos bajo ángulos iguales uno al otro, impiden los desplazamientos horizontales del peso, pero por la vertical el peso tiene libertad de desplazamiento porque, al tener los hilos una longitud considerable, las oscilaciones verti-

cales pequeñas del peso sobre muelle suceden sin obstáculos si los hilos no están tensados. La longitud del hilo tiene que sobrepasar no menos de diez veces la amplitud de oscilaciones del peso. Prácticamente, en varias ocasiones, se logra realizar el experimento sin hilos, porque los desplazamientos horizontales del peso no empiezan de una vez (véase más adelante, p. 4).

Las oscilaciones se transmiten al peso a consecuencia de su desviación forzada del estado de equilibrio; tirando del peso con la mano hacia abajo, se suelta de repente. El peso se levanta y luego empieza el movimiento oscilatorio por la vertical.

Si las amplitudes son pequeñas, la frecuencia de oscilaciones no depende de la amplitud. Para convencerse de esto, el experimento se repite con una amplitud cambiada.

Supongamos que durante 30 s el peso hizo 75 oscilaciones. Entonces, la frecuencia de oscilaciones será

$$f=\frac{75}{30}=2,5$$

y la frecuencia circular,

$$k=2\pi f=15,7\frac{1}{s}.$$

3. Comparación de los datos experimentales y teóricos. La fórmula teórica para la determinación de la frecuencia circular de oscilaciones naturales de una masa puntual con un grado de libertad sujetada elásticamente, tiene la forma siguiente:

$$k=\sqrt{\frac{g}{\delta}},$$

siendo g la aceleración de la gravedad; δ, el asentamiento del sistema elástico que soporta el peso cuando éste se aplica estáticamente.

Para nuestro caso de un muelle cilíndrico helicoidal con un paso pequeño tenemos lo siguiente:

$$\delta=\frac{8PD^3n}{Cd^4},$$

donde D es el diámetro del muelle; n, el número de espiras; G, el módulo de deslizamiento del material del muelle; d, el diámetro del alambre; P, el peso de la carga aplicada.

4. Oscilaciones relacionadas. Si el asentamiento del resorte δ (para la aplicación estática del peso) se aproxima a $l/4$, siendo l la distancia desde el punto de suspensión del muelle hasta el centro de gravedad del peso, la excitación de las oscilaciones laterales se observa con mayor evidencia (si faltan los hilos que sirven de arriostramiento transversal). La energía de las oscilaciones verticales se transforma paulatinamente en la energía de

las oscilaciones angulares (de vaivén). En el momento de la amplitud máxima de las oscilaciones angulares cesan los desplazamientos verticales; luego de nuevo empiezan las oscilaciones verticales que crecen lentamente con la disminución simultánea de las angulares [1].

En el caso señalado tiene lugar la llamada excitación paramétrica provocada por lo siguiente: durante las oscilaciones verticales la longitud del péndulo, un parámetro que influye sobre el valor de la energía de las oscilaciones angulares, se cambia periódicamente con una frecuencia más favorable (igual a la frecuencia doble de las oscilaciones angulares). La acción contraria de las oscilaciones angulares sobre las verticales también tiene resonancia. Para el muelle con las dimensiones señaladas anteriormente, las oscilaciones relacionadas paramétricamente suceden cuando $l = 16$ cm.

EXPERIMENTO 22. ESTUDIO DE OSCILACIONES LIBRES DE UNA BANDA

1. Datos generales y teóricos. El estudio experimental de las oscilaciones libres de flexión de una banda se reduce a la determinación de las frecuencias principales más bajas de las variedades consecutivas de oscilaciones y la búsqueda para cada frecuencia de la posición de las líneas nodales, en cuyos puntos las amplitudes de oscilaciones son nulas. A base de estas líneas se determina la forma de las oscilaciones que corresponde a la frecuencia dada.

La determinación experimental de las frecuencias de oscilaciones libres de una banda se basa en el fenómeno de la resonancia, caracterizado por un crecimiento brusco de la amplitud. Con este fin se aplica a la banda una fuerza periódica perturbadora, se aumenta poco a poco la frecuencia de sus oscilaciones y se observa cómo va cambiando la amplitud de oscilaciones de la banda. En el momento del primer aumento brusco de la amplitud (estado de resonancia) la frecuencia de oscilaciones de la fuerza perturbadora coincide con la frecuencia fundamental (primera) de oscilaciones libres de la banda. Al seguir aumentando la frecuencia de la fuerza perturbadora se origina primeramente la disminución de la amplitud y luego su aumento brusco. En este momento la frecuencia de la fuerza coincide con la segunda frecuencia principal de la banda. El aumento ulterior de la frecuencia de la fuerza perturbadora da magnitudes consecutivas de las frecuencias principales para cada salto de la amplitud.

---

[1] *L. I. Mandelshtam* y otros, Nuevas investigaciones de oscilaciones no lineales, Editorial estatal para los asuntos de radio, 1936.

Es posible determinar la posición de las líneas nodales de cada forma fundamental de oscilaciones si espolvoreamos la banda con arena fina que se desplaza bajo la influencia de la vibración hacia los lugares con amplitudes nulas. También se puede utilizar una sonda, cuyo contacto con los lugares vibrantes de la banda provoca el cambio de la amplitud, siendo constante la frecuencia. Si la sonda toca las líneas nodales, la amplitud de vibración no varía.

Investiguemos una banda alargada rectangular de duraluminio empotrada por su lado corto (fig. 72). En estas condiciones se puede considerar la banda como una viga ancha, con un extremo

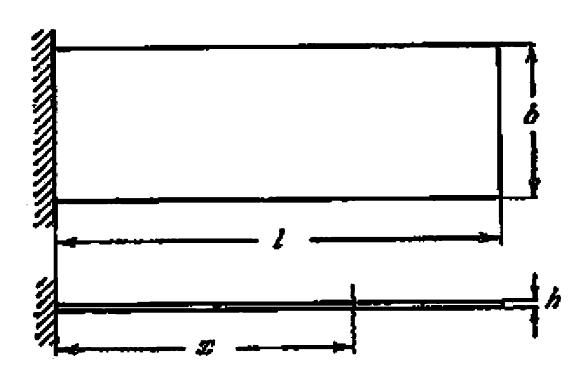


Fig. 72 | Banda para investigar las oscilaciones.

empotrado y otro libre. La ecuación de las oscilaciones transversales de tal viga-banda, como sistema con un número infinitamente grande de grados de libertad, se deduce de la ecuación de la línea elástica que tiene el siguiente aspecto:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4}=\frac{p_i}{EI};$$

donde p_i es la carga distribuida sobre la unidad de longitud igual a las fuerzas de inercia de la masa de la banda que surgen durante las oscilaciones libres, es decir,

$$p_i=-\frac{p}{g}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}.$$

La ecuación diferencial de las oscilaciones de la banda tendrá la forma siguiente:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4}=-\frac{p}{EIg}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2},$$

siendo v la flecha de la banda; EI, la rigidez a flexión en el plano de las oscilaciones; p, el peso lineal de la banda; g, la acelera-

ción de la gravedad; $\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$, la aceleración del movimiento de los puntos del eje de la banda.

Durante las oscilaciones la flecha v es la función de la coordenada x y el tiempo t. Se puede presentar la flecha en forma de producto de una función X que depende solamente de la coordenada x, y una función armónica sen $(\omega t + \alpha)$ que solamente depende del tiempo t,

$$v = X \operatorname{sen} (\omega t + \alpha).$$

Aquí ω es la frecuencia circular de oscilaciones.

Tomando las derivadas de la flecha v con relación a la longitud x y el tiempo t, las introducimos en la ecuación diferencial de las oscilaciones. Después de reducir sen $(\omega t + \alpha)$ e introducir la denominación

$$\lambda^4 = \frac{\omega^2 p}{EJg}, \tag{49}$$

obtenemos para la función X, que caracteriza la forma de las oscilaciones, una ecuación diferencial lineal homogénea de cuarto orden con coeficientes constantes

$$\frac{d^4 X}{dx^4} - \lambda^4 X = 0. \tag{50}$$

En esta ecuación la derivada parcial se sustituye por la total, porque X no depende del tiempo. La integral general de esta ecuación es la siguiente:

$$X = A \operatorname{sen} \lambda x + B \cos \lambda x + C \operatorname{sh} x + D \operatorname{ch} \lambda x. \tag{51}$$

Las constantes de integración se deducen de las condiciones de frontera, las cuales consisten para un voladizo (fig. 72) en que en el empotramiento (cuando $x = 0$) la flecha $v = X \operatorname{sen}(\omega t + \alpha)$ y el ángulo de giro de la sección $\theta = \frac{\partial v}{\partial x}$ se convierten en cero; y en el extremo libre (cuando $x = l$) se convierten en cero el momento flector $M = -EJ\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ y la fuerza cortante $Q = -EJ\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}$. Las condiciones frontera tienen que cumplirse independientemente del tiempo, lo que conduce a las condiciones análogas para la función X, a saber:

$$\left.\begin{array}{llll} \text{cuando } x = 0: & 1) \quad X = 0; & 2) \quad \frac{dX}{dx} = 0; \\ \text{cuando } x = l: & 3) \quad \frac{d^2X}{dx^2} = 0; & 4) \quad \frac{d^3X}{dx} = 0. \end{array}\right\} \tag{52}$$

Introduciendo el valor $x = 0$ en la expresión (51) para la función X y en la expresión para su derivada, hallamos de las

dos primeras condiciones (52) que

$$D = -B \quad \text{y} \quad C = -A.$$

Teniendo en cuenta este resultado, obtenemos lo siguiente:

$$X = A(\operatorname{sen}\lambda x - \operatorname{sh}\lambda x) + B(\cos\lambda x - \operatorname{sh}\lambda x). \qquad (53)$$

La ecuación (53) se utiliza en adelante para determinar las formas de las líneas elásticas durante las oscilaciones con distintas frecuencias. Para calcular las frecuencias principales, se componen las expresiones de la segunda y tercera derivadas de X,

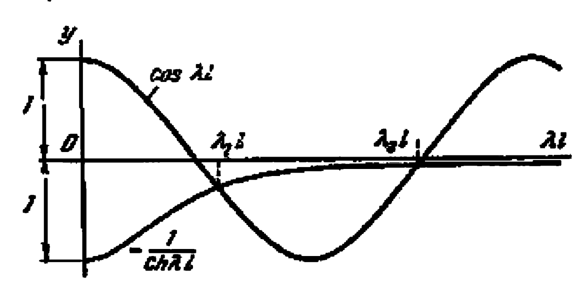


Fig. 73 | Determinación gráfica de las raíces de la ecuación $\cos\lambda l \operatorname{ch}\lambda l = -1$.

considerando que $x = l$, y de acuerdo con las dos últimas condiciones (52) se llega al sistema de dos ecuaciones homogéneas:

$$\left.\begin{aligned} A(\operatorname{sen}\lambda l + \operatorname{sh}\lambda l) + B(\cos\lambda l + \operatorname{ch}\lambda l) = 0, \\ A(\cos\lambda l + \operatorname{ch}\lambda l) - B(\operatorname{sen}\lambda l - \operatorname{sh}\lambda l) = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (54)$$

La solución trivial de este sistema es $A = B = 0$. Entonces, la función X y, por consiguiente, la flecha v serán iguales a cero y no habrá vibraciones. Si éstas existen, las constantes A y B tendrán valores diferentes de cero, lo que es posible solamente a condición de ser nula la determinante de los coeficientes de las constantes. Cumpliendo con esta condición, obtenemos una ecuación transcendental,

$$\cos\lambda l \operatorname{ch}\lambda l = -1. \qquad (55)$$

Precisamente esta ecuación sirve para la determinación de las frecuencias naturales principales de oscilaciones. Una vez construidas las curvas $y = \cos\lambda l$ e $y = -\frac{1}{\operatorname{ch}\lambda l}$ (fig. 73), fácilmente encontramos que la ecuación de frecuencias tiene un sinfín de raíces $\lambda_1 l$, $\lambda_2 l$, ..., $\lambda_n l$, determinadas por los puntos de intersección de estas curvas. Calculadas de tal manera las raíces consecutivas que corresponden a las frecuencias principales de las variedades

consecutivas de oscilaciones de una viga-banda, tienen los valores expuestos en la tabla 36.

Tabla 36

$i =$	1	2	3	4	5	6	...	n
$\lambda_i l =$	1,875	4,694	7,855	10,996	14,137	17,279	...	$\lambda_{n-1} l + \pi$

En dependencia de las raíces halladas deducimos de la expresión (49) la fórmula para la frecuencia principal por segundo de la i-ésima forma de vibración:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{(\lambda_i)^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJg}{p}}. \tag{56}$$

La frecuencia fundamental se obtiene cuando $\lambda_i l = 1{,}875$.

Para determinar la forma de oscilaciones, basta hallar de las ecuaciones (54) las magnitudes que son proporcionales a las constantes A y B. Así, pues, se puede considerar que

$$A = \cos\lambda l + \operatorname{ch}\lambda l \quad \text{y} \quad B = -(\operatorname{sen}\lambda l + \operatorname{sh}\lambda l),$$

lo que satisface las ecuaciones (54), cumpliendo a la vez la condición (55). Entonces la expresión (53) que determina la forma de oscilaciones, tendrá el siguiente aspecto:

$$X = (\cos\lambda l + \operatorname{ch}\lambda l)(\operatorname{sen}\lambda x - \operatorname{sh}\lambda x) -$$
$$- (\operatorname{sen}\lambda l + \operatorname{sh}\lambda l)(\cos\lambda x - \operatorname{ch}\lambda x).$$

Introduciendo en esta fórmula los valores consecutivos de $\lambda_i l$, se puede construir, por medio de las tablas de funciones trigonométricas e hiperbólicas, las curvas elásticas de oscilaciones principales y a base de éstas hallar las líneas nodales donde la amplitud $X = 0$. En la fig. 74 se muestran las curvas elásticas para los primeros cuatro tipos de oscilaciones. A ellas corresponden las siguientes líneas nodales, ubicadas a una distancia x del empotramiento:

para la 1ª frecuencia una línea nodal $x_1 = 0$;
para la 2ª, dos líneas $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}77l$;
para la 3ª, líneas $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}5l$, $x_3 = 0{,}87l$,
para la 4ª, » $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}36l$, $x_3 = 0{,}64l$, $x_4 = 0{,}91l$;
para la 5ª, » $x_1 = 0$, $x_2 = 0{,}18l$, $x_3 = 0{,}5l$, $x_4 = 0{,}74l$, $x_5 = 0{,}89l$.

Para las frecuencias intermedias las variedades de oscilaciones son resultado de la superposición de las formas principales de oscilaciones unas sobre otras

2. Realización del ensayo. La banda *2* (fig. 75), empotrada por el extremo corto en un apoyo macizo, oscila por medio del vibrador *3* (véase el § 8 en la pág 199), alimentado por la corriente alterna del generador de ondas acústicas *1* del tipo ЗГ-2A (ZG-2A). El generador de ondas acústicas permite variar la frecuencia de la corriente de 20 a 20 000 Hz. Simultáneamente, las

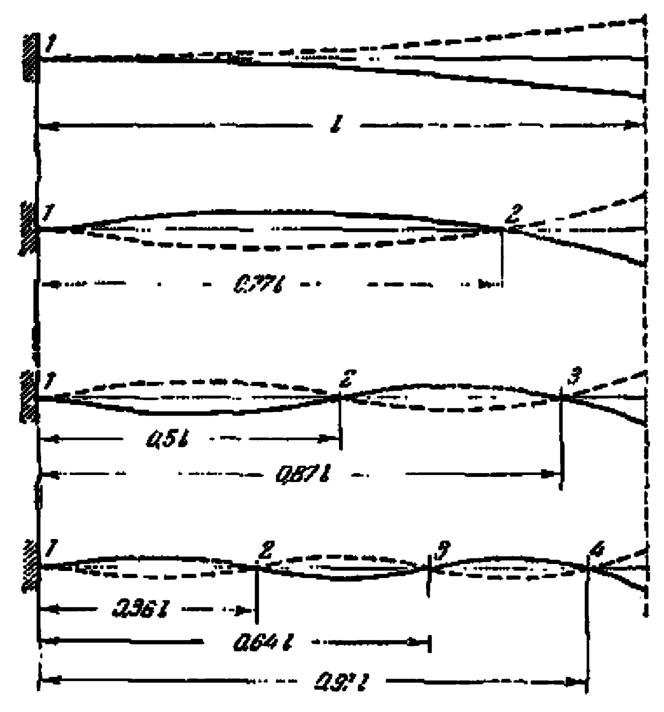


Fig. 74 | Líneas elásticas de las oscilaciones principales de la banda para las cuatro primeras frecuencias principales.

oscilaciones de la banda se fijan en la pantalla del osciloscopio de rayos catódicos [tipo ЭO-7 (EO-7)]. La transformación de las vibraciones mecánicas del extremo de la banda en las eléctricas y su transporte para el osciloscopio se realizan por medio del captador piezoeléctrico *4* (véase el § 8 en la pág. 200).

Antes de realizar el ensayo es necesario comprobar si los instrumentos están conectados correctamente según el esquema de la fig. 75, poner en contacto con la banda las agujas del vibrador y del captador, conectar en el circuito el generador de ondas acústicas y el osciloscopio y calentarlos durante 4 ó 5 min. La conexión del generador de ondas acústicas se hace mediante el interruptor *4* (fig. 76), encendiendo la bombilla de señales *5*. Una vez terminado el calentamiento, se efectúa el reglaje inicial

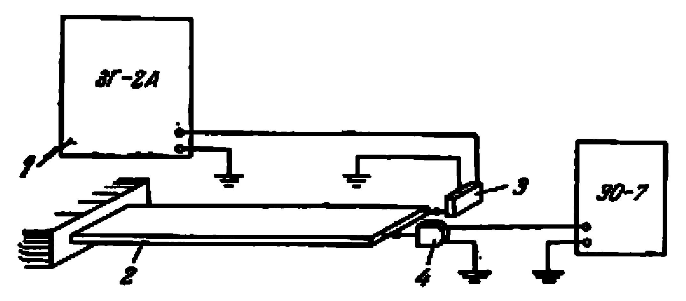


Fig. 75 | Esquema de conección del equipo para investigar las oscilaciones de la banda: *1*, generador de ondas acústicas ЗГ-2А (ZG-2A); *2*, banda; *3*, vibrador; *4*, captador piezoeléctrico.

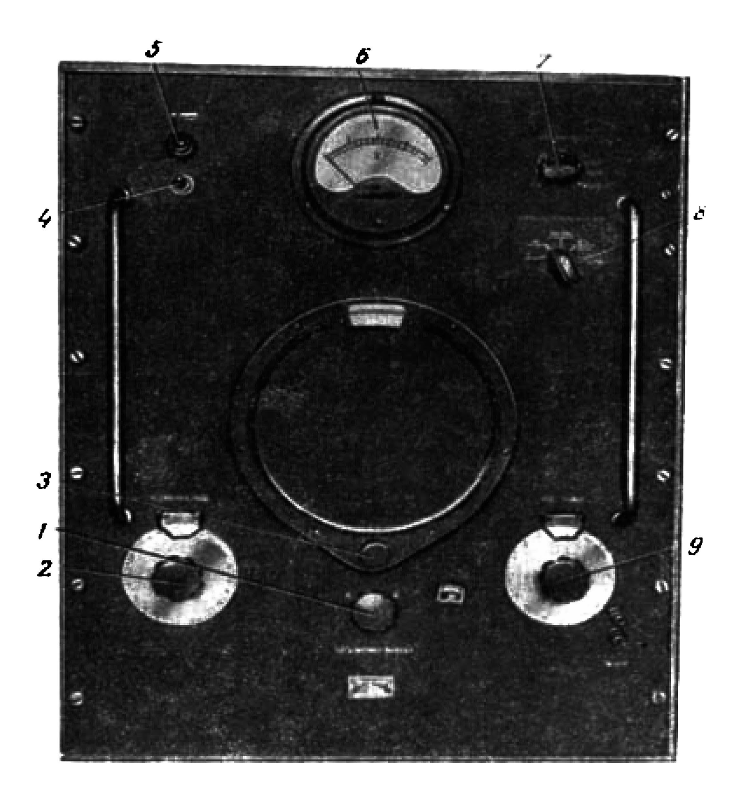


Fig. 76 | Pared delantera del generador de ondas acústicas del tipo ЗГ-3А (ZG-3A): *1*, regulación de salida; *2*, limbo de la puesta en cero; *3*, manecilla del limbo de frecuencia; *4*, interruptor del generador; *5* = bombilla de señales; *6*, voltímetro; *7*, conmutador escalonado «milivoltios»; *8*, conmutador de la salida; *9*, limbo «desintonización».

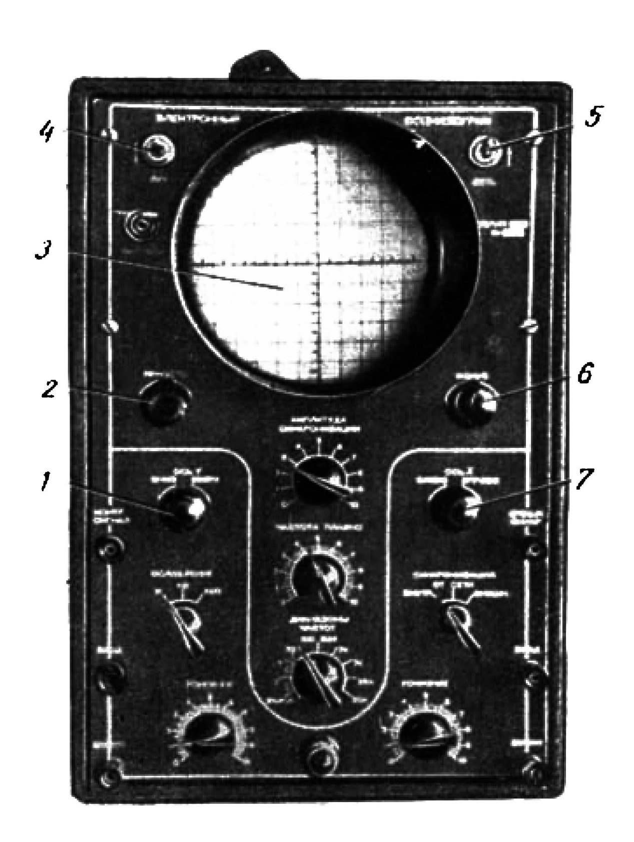


Fig. 77 | Tapa del osciloscopio del tipo ЭО-7 (FO-7): *1*, manecilla «eje *y*»; *2*, regulación del brillo; *3*, pantalla; *4*, interruptor «rayo»; *5*, interruptor «red»; *6*, regulación del foco; *7*, manecilla «eje *x*».

(el ajuste del cero de la frecuencia). Con este propósito se pone en cero primeramente el limbo con la inscripción "frecuencia" por medio de la manecilla *3*, luego el limbo *9* "desintonización" y, finalmente, moviendo el limbo *2* "puesta en cero", la aguja del voltímetro *6* también se pone en la posición cero.

La amplitud de la tensión de salida se regula suavemente con la manecilla *1* "regulación de salida" o escalonadamente mediante los conmutadores *7* "milivoltios" y *8* "conmutador de salida".

Antes de conectar el osciloscopio se debe hacer girar la manecilla *2* con la inscripción "brillo" a la derecha hasta el tope, y poner la manecilla *6* "foco" (fig. 77) en la posición intermedia. El oscilógrafo se conecta con los interruptores *4* "rayo" y *5* "red" por la aguja, después de lo cual se enciende la bombilla de señales y a los 2—3 minutos en la pantalla *3* aparece un

punto luminoso. Para desplazar el punto hacia el centro de la pantalla sirven las manecillas *1* "eje *y*" y *7* "eje *x*". Mediante las manecillas *2* "brillo" y *6* "foco" se logran el brillo deseable y las dimensiones mínimas del punto luminoso.

Para realizar el ensayo se suministra la corriente del generador de ondas acústicas al vibrador, excitando las oscilaciones de la banda. Con la manecilla *3* (fig. 76) se aumenta poco a poco la frecuencia de la tensión suministrada y se observa en la pantalla del oscilógrafo el cambio de la amplitud de oscilaciones de la banda. Mientras la frecuencia de la tensión no coincide con la frecuencia natural de oscilaciones de la banda, la amplitud se mantiene igual. Fijando el momento del crecimiento más brusco de la amplitud (la resonancia), se deja de hacer girar la manecilla *3*; en el limbo "frecuencia" del generador de ondas acústicas se toma la lectura de la frecuencia de la tensión suministrada que coincide con la primera frecuencia natural de oscilaciones de la banda; mediante el retículo que tiene la pantalla del oscilógrafo se mide la magnitud de la amplitud máxima y, espolvoreando la banda con un poco de arena fina, se determina la posición de las líneas nodales correspondientes. Luego se aumenta de nuevo suavemente la frecuencia hasta la resonancia siguiente. De tal manera, se toman las frecuencias y se miden las amplitudes y las posiciones de las líneas nodales para cinco frecuencias naturales consecutivas de oscilaciones de la banda.

Los resultados de las observaciones se anotan en el registro de acuerdo con la forma mostrada en la tabla 37.

Tabla 37

Orden de frecuencias naturales	Número de oscilaciones	Distancia x del empotramiento hasta las líneas nodales (sobre la raya, x cm; bajo la raya, x/l)					Amplitud máxima	
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	en la pantalla	real
1ª (fundamental)								
2ª								
3ª								
4ª								
5ª								

CAPÍTULO III

Ensayos de estabilidad

EXPERIMENTO 23. ESTABILIDAD DE BARRAS COMPRIMIDAS

1. Datos generales. El experimento consiste en reproducir algunos casos más simples de pérdida de estabilidad de la forma rectilínea del equilibrio de una barra comprimida y determinar experimentalmente valores críticos de la fuerza de compresión. La fórmula teórica para la fuerza crítica —la fórmula de Euler— es la siguiente:

$$N_{crit} = \frac{\pi^2 E I_{min}}{(\mu l^2)}, \tag{57}$$

donde μ es el coeficiente que depende del modo de sujeción de los extremos de la barra (fig. 78), llamado coeficiente de reducción de la longitud.

La fórmula de Euler tiene aplicación, si la esbeltez de la barra $\lambda = \frac{\mu l}{i_{min}}$ $\left(\text{aquí } i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{F}}\right.$ es el radio mínimo de giro de la sección de la barra) es no menor que su magnitud límite $\lambda_{lim} = \pi\sqrt{\frac{E}{\sigma_{pr}}}$ que corresponde al límite de proporcionalidad del material. Las magnitudes límite de la esbeltez son las siguientes: para el acero dulce, alrededor de 100; para el dural y la madera, alrededor de 60. Para las magnitudes menores de la esbeltez λ la fórmula (57) ya no tiene vigor, porque la pérdida de estabilidad va acompañada de unas tensiones que sobrepasan el límite de proporcionalidad. En estos casos se utilizan fórmulas empíricas y tablas o diagramas correspondientes a éstas. La fórmula de Yasinski para la tensión crítica $\sigma_{crit} = \frac{N_{crit}}{F}$ tiene la forma:

$$\sigma_{crit} = a - b\lambda.$$

Para el acero Cт. 3 (St. 3), si λ es de 40 a 100, los coeficientes a y b son los siguientes: $a = 3360$ kgf/cm², $b = 14{,}7$ kgf/cm². Para la madera (el pino) $a = 293$ kgf/cm², $b = 1{,}94$ kgf/cm². Las fórmulas empíricas ofrecen unos resultados muy aproximados, sobre todo para la madera.

Los experimentos de investigación de la estabilidad se realizan en máquinas o instalaciones especiales. Para este propósito son cómodas las máquinas de pequeña potencia que permiten ensayar probetas de una longitud considerable. Son, por ejemplo, la máquina de Amsler de 2 tf (la discripción de la máquina del mismo tipo ГЗИП-5 (GZIP-R5) se da en el experimento 2) y la máquina de 3 tf descrita en el § 12 de la parte II.

Las probetas más largas se ensayan en instalaciones especiales, cuyos esquemas se exponen en el § 34 de la parte II.

2. Realización del ensayo. La probeta se pone en la máquina verticalmente, cargándola a mano lenta y suavemente. Se debe

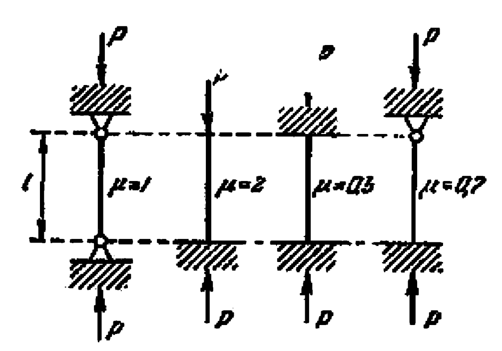


Fig. 78 | Valor del coeficiente μ de reducción de la longitud para algunos casos de fijación de la barra.

observar constantemente el aumento de la carga y el comportamiento de la probeta. La interrupción del crecimiento de la carga junto con el aumento del pandeo corresponde al valor crítico de la fuerza de compresión. A veces, para observar los pandeos de probetas rígidas, se utilizan indicadores que se ponen en cada uno de los dos lados opuestos. En tal posición sus muelles se equilibran mutuamente.

Al utilizar probetas menos rígidas, para medir los pandeos se puede hacer uso de una regla supletoria.

Para las barras flexibles tales dispositivos no son necesarios, porque su pandeo bajo la carga crítica es grande y se ve a simple vista.

Se puede tener una idea sobre el grado de proximidad de la carga al valor crítico por la frecuencia de oscilaciones naturales de la barra que disminuye al seguir cargando y es nula durante la carga crítica. Generalmente, la barra se pone en estado de oscilación a mano: se la deforma un poco y de pronto se suelta.

La forma de inscripción en el registro del laboratorio se da en la tabla 38.

Tabla 38

Esquema de fijación de la probeta (dibujo)				
Material				
Módulo de elasticidad E, kgf/cm²				
Longitud de la probeta l, cm				
Sección transversal de la probeta (dibujo)				
Area de la sección F, cm²				
Momento de inercia de la sección J_{min}, cm⁴				
Radio de giro de la sección $i_{min}=\sqrt{\frac{J_{min}}{F}}$, cm				
Coeficiente de reducción de la longitud μ				
Relación de esbeltez $\lambda=\frac{\mu l}{i_{min}}$				
Fórmula para calcular la fuerza crítica				
Fuerza crítica, kgf	Calculada			
	Del experimento			

3. Método de Southwell. Se utiliza la relación entre el pandeo transversal f de la barra y la fuerza de compresión N:

$$f=N_{crit}\frac{f}{N}-f_0,$$

donde f_0 es el pandeo inicial de la barra (a partir de la cual se mide f).

Según esta fórmula la fuerza crítica N_{crit} se determina como la pendiente de una recta construida a base de las cantidades f medidas en medio de la barra (se colocan sobre el eje de las ordenadas) y los valores correspondientes de f/N (colocados sobre el eje de las abscisas). Se debe trazar una recta por estos puntos de modo que la dispersión sea mínima. No es necesario medir el pandeo inicial f_0.

4. Ensayo de probetas de madera. La madera es un material heterogéneo; los valores del módulo de elasticidad que figuran en las tablas son muy aproximados, sobre todo para probetas

pequeñas. Por eso, al comprobar la fórmula de Euler, es conveniente someter previamente las probetas de madera a flexión transversal para determinar su rigidez a flexión EJ. Por la teoría de la flexión se sabe que la fórmula para la flecha de una viga

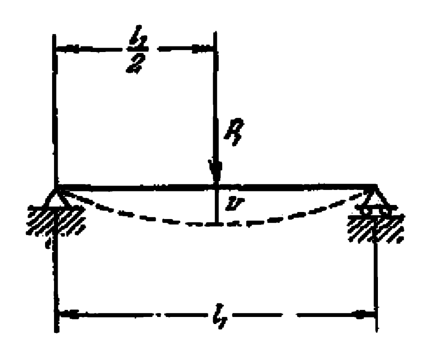


Fig. 79 | Carga de una probeta de madera para determinar la rigidez a flexión.

(fig. 79) cargada en su punto medio con fuerza concentrada es la siguiente:

$$v = \frac{P_1 l_1^3}{48EJ}. \qquad (59)$$

La flecha v también se obtiene del experimento; entonces de la fórmula (59) se deduce la rigidez EJ de la probeta, es decir,

$$EJ = \frac{P_1 l_1^3}{48v}.$$

Si, por ejemplo, $P_1 = 15$ kgf y $l_1 = 40$ cm, entonces

$$EJ = \frac{15 \cdot 40^3}{48v} = \frac{20\,000}{v} \text{ (kgf/cm}^2\text{)},$$

donde v se da en centímetros.

La fuerza P_1 tiene que aplicarse en el plano de la rigidez mínima de la muestra y su magnitud de antemano tiene que encontrarse dentro de la proporcionalidad entre carga y deformación. El ensayo a flexión se hace dos veces, es decir, por ambos lados de la probeta. De los dos valores obtenidos de la flecha se toma el mayor, como corresponde al valor mínimo de la rigidez y, por tanto, de la fuerza crítica.

El método experimental de determinación de la rigidez EJ de la probeta, descrito más arriba, puede ser aplicado para probetas metálicas con el fin de unificar la metodología del experimento, simplificando así los cálculos. Ya no es necesario calcular el momento de inercia J. El radio de giro i_{min} de una sección rectan-

gular se determina por la fórmula

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I}{F}} = \sqrt{\frac{\frac{bh^3}{12}}{bh}} = 0,288h, \qquad (60)$$

siendo h la dimensión mínima de la sección (el espesor de la muestra).

En el caso de una sección circular $i = 0,5\ r$, o sea, el radio de giro es igual a la mitad del radio geométrico.

EXPERIMENTO 24. PERDIDA DE ESTABILIDAD POR UNA ACCION COMBINADA DE FLEXION Y TORSION

1. Datos generales. La finalidad del experimento consiste en investigar experimentalmente la pérdida de estabilidad por una acción combinada de flexión y torsión. Tratemos de determinar la

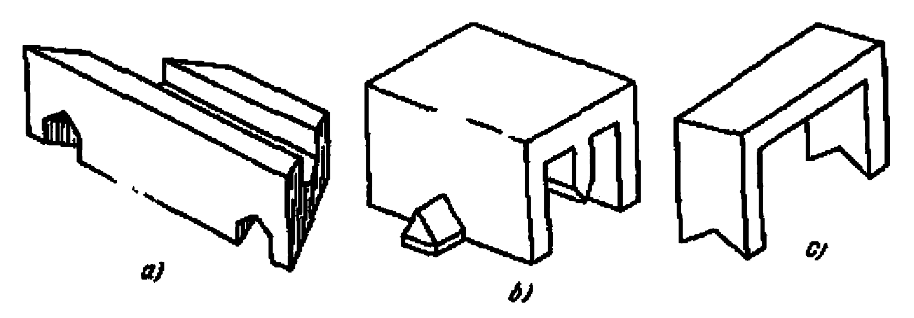


Fig. 80 | Detalles de la punta que realiza la articulación tridimensional: *a*, junta; *b*, balancín; *c*, apoyo.

fuerza crítica de un angular de alas iguales comprimido en el centro con los extremos apoyados articuladamente que tienen libertad de deplanación, pero privados de libertad de giro con respecto al eje del angular.

El apoyo articulado de la barra en el punto final de su eje permite la libertad de giro del extremo de la barra respecto a dos ejes que pasan por este punto y son perpendiculares al eje de la barra, por ejemplo, los ejes principales de inercia de la sección de tope. La condición dada la satisface una punta que aparece desarmada en la fig. 80 y armada, en la fig. 81. La junta (fig. 80, *a*) es destinada para distribuir la carga sobre el tope de la muestra; las ranuras inferiores orientadas entre sí bajo ángulo recto, se ponen en el extremo de la muestra. El balancín (fig. 80, *b*) sirve de elemento intermedio entre la junta y el apoyo (fig. 80, *c*) que toma la carga del plato de la máquina. El balancín tiene dos nervios mutuamente perpendiculares que coinciden con los ejes principales de inercia de la sección de tope de la barra. Los giros

del tope son posibles respecto a estos nervios. En la fig. 81 los detalles particulares tienen la misma denominación de la fig. 80.

2. Datos teóricos. En el caso examinado de una barra comprimida en el centro con sus extremos apoyados mediante articulaciones, la fuerza crítica P_{crit} que corresponde a la pérdida de estabilidad por una acción combinada de flexión y torsión, se obtiene de la siguiente ecuación cuadrada:

$$(P_y - P_{crit})(P_\omega - P_{crit})r^2 - P_{crit}^2 a_y^2 = 0. \quad (61)$$

donde

$$r^2 = a_y^2 + \frac{J_y + J_z}{F},$$

$$P_y = \frac{\pi^2 E J_y}{l^2},$$

$$P_\omega = \frac{1}{r^2}\left(\frac{\pi^2 E J_\omega}{l^2} + GJ_k\right),$$

Fig. 81 | Punta armada.

siendo F, J_y, J_z, J_ω, J_k el área, los momentos principales de inercia, el momento sectorial de inercia y la característica de la rigidez de la sección transversal de la barra sometida a torsión, respectivamente; a_y es la coordenada del centro de flexión con respecto a los ejes principales de inercia; E y G son módulos de elasticidad del material.

Para un angular de alas iguales (fig. 82) de un ancho a y un espesor t tenemos lo siguiente:

$$F = 2at, \quad J_y = \frac{ta^3}{3}, \quad J_z = \frac{ta^3}{12},$$

$$J_\omega = 0, \quad J_k = \frac{2at^3}{3}, \quad a_y = \frac{a}{2\sqrt{2}}, \quad r^2 = \frac{a^2}{3}.$$

Considerando $a = 20$ tf, $l = 10a$, $G = \frac{3}{8}E$, calculamos partiendo de la ecuación (61):

$$P_{crit} = 0{,}036Et^2, \quad \sigma_{crit} = \frac{P_{crit}}{F} = 0{,}00090E.$$

Para $E = 2{,}1 \cdot 10^6$ kgf/cm² y $t = 0{,}15$ cm obtenemos

$$P_{crit} = 0{,}036 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 0{,}15^2 = 1700 \text{ kgf} \quad \text{y}$$

$$\sigma_{crit} = 1900 \text{ kgf/cm}^2.$$

Para $t = 1$ mm hallamos $\sigma_{crit} = 850$ kgf/cm².

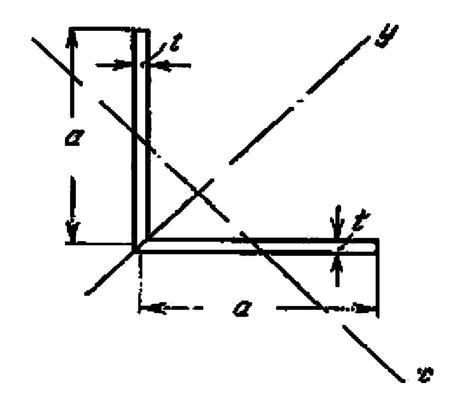


Fig. 82 | Angular de alas iguales.

Hemos hallado la fuerza y la tensión críticas para el caso de pérdida de estabilidad por una acción combinada de flexión y torsión. Sin embargo, en este caso es posible la pérdida de estabilidad de una barra de paredes delgadas a causa de flexión plana. Aclaremos si la tensión crítica que corresponde a la flexión plana es menor que la obtenida anteriormente.

Calculemos el radio de giro mínimo de la sección de la barra

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{F}} = \sqrt{\frac{ta^3}{12 \cdot 2ta}} = \frac{a}{2\sqrt{6}}$$

y la relación de esbeltez

$$\lambda = \frac{l}{i_x} = \frac{10a \cdot 2\sqrt{6}}{a} = 49.$$

Teniendo tal relación de esbeltez, la barra de acero pobre en carbono pierde la estabilidad a compresión a causa de flexión plana muy lejos de los límites de proporcionalidad, es decir, al-

canzando una tensión que excede considerablemente la obtenida anteriormente para la pérdida de estabilidad por una acción combinada de flexión y torsión. En el caso de una barra de acero aleado obtenemos utilizando la fórmula de Euler:

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 2{,}2 \cdot 10^6}{49^2} = 9000 \text{ kgf/cm}^2.$$

En consecuencia, también en este caso la tensión es mucho más grande que la hallada anteriormente. Así pues, la barra examinada pierde la estabilidad por una acción combinada de flexión y torsión, lo que tiene que ser comprobado experimentalmente en este ensayo.

EXPERIMENTO 25. ESTABILIDAD DE FLEXION PLANA DE UNA BANDA

1. Datos generales. El propósito del experimento es conocer el fenómeno de pérdida de estabilidad por flexión. Determinemos

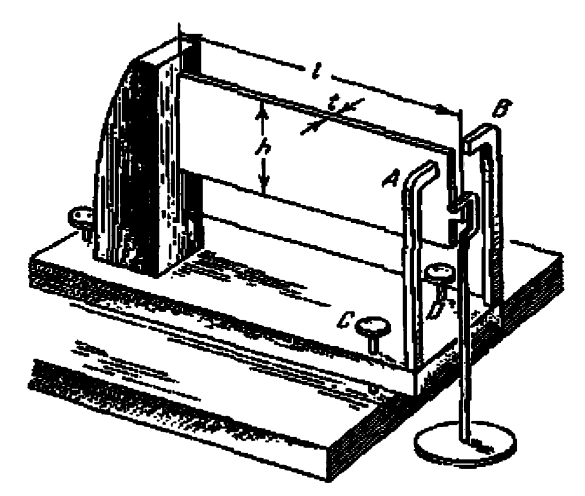


Fig. 83 | Instalación de mesa para observar la pérdida de estabilidad de flexión plana del voladizo.

experimentalmente la carga crítica para una banda empotrada por un extremo (fig. 83), y comparemos los valores obtenidos de la carga crítica con los teóricos.

La parte fundamental de la instalación de ensayo es una banda de acero o dural, bien empotrada por un extremo y que tiene en el otro ganchos o salientes para colgar la carga a diferente altura. Los limitadores de deformación A y B protegen la

probeta del deterioro al cargarla con fuerza crítica. La tabla inferior del armazón se apoya sobre la mesa en tres puntos: una pata inmóvil ubicada debajo del lugar de sujeción del voladizo, y dos patas móviles en forma de tornillos C y D que sirven para poner el voladizo ensayado estrictamente en el plano vertical y su eje, en el plano horizontal.

Las dimensiones de la muestra tienen que permitir la carga directa (véase a continuación el p. 3).

2. Realización del experimento. Con cargas pequeñas la banda no pierde su forma plana. Si la carga se aproxima a la crítica, puede observarse el pandeo de dicha banda en la dirección perpendicular a su plano. Un pandeo considerable indica que el estado de la viga es crítico y corresponde a la carga crítica; la viga se apoya sobre los limitadores.

Cabe señalar que la carga crítica puede resultar menor que la real a causa de una colocación inexacta de la banda que se ensaya. Si aparece una inclinación antes de tiempo, hay que tratar de ajustar su posición por medio de los tornillos de ajuste C y D.

3. Datos teóricos. La carga crítica para el caso examinado de una banda cargada con fuerza concentrada en el extremo, aplicada en el centro de gravedad de la sección, es como sigue:

$$P_{crit} = 4\frac{\sqrt{BC}}{l^2}, \tag{62}$$

donde B es la rigidez a flexión mínima de la viga;

C es la rigidez a torsión.

La magnitud $B = EJ_{min}$ se determina por el momento de inercia mínimo de la sección de la muestra.

La rigidez a torsión $C = G\beta ht^3$; el coeficiente β se determina en función de la relación h/t de los lados de la sección de la banda [1]. Cuando $\frac{h}{t} \geqslant 10$, se puede aceptar $\beta = \frac{1}{3}$. En este caso $C = G\frac{ht^3}{3}$.

Considerando el módulo del deslizamiento (de corte) G igual a $\frac{3}{8}E$, deducimos de la fórmula (62)

$$P_{crit} = 0,4\frac{ht^3E}{l^2}. \tag{63}$$

Por ejemplo, cuando $l = 100$ cm, $h = 8$ cm, $t = 0,3$ cm y $E = 7\cdot 10^5$ kgf/cm² (dural), de la fórmula (63) hallamos $P_{crit} = 6$ kgf.

[1] Véase *V. I. Feodosiev*. Resistencia de materiales. Editorial «MIR», 1972, págs. 99—100.

CAPÍTULO IV

Métodos especiales de investigación de las tensiones

EXPERIMENTO 26. INVESTIGACIÓN DE LAS TENSIONES EN LA LUZ POLARIZADA. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE UNA FRANJA

1. Fundamentos físicos del método. En la práctica de ingeniería no son pocos aquellos casos, cuando la solución teórica o la extensometría son imposibles. En algunos de estos casos se hace uso del método óptico de investigación sobre maquetas transparentes. El método óptico resultó especialmente útil para la investigación de las concentraciones de tensiones en los ángulos y rebajos, donde es imposible poner extensómetros.

Dicho método se basa en el fenómeno de la anisotropía óptica de muchas substancias transparentes amorfas, que se observa al cargarlas con fuerzas exteriores. Tales materiales, que se llaman ópticamente sensibles, son el cristal, el celuloide y muchos plásticos. Una vez quitada la carga, la propiedad de anisotropía óptica desaparece, lo que sirvió de argumento para el empleo del término *fotoelasticidad*; a veces el propio método se llama método de fotoelasticidad.

Se puede determinar experimentalmente la distribución de las tensiones en la maqueta de una pieza investigada, fabricada de un material ópticamente activo. La misma distribución de las tensiones ha de existir en la pieza verdadera, porque el carácter de distribución de las tensiones no depende de su material, sino de su forma y el tipo de carga. Las tensiones en la pieza verdadera son proporcionales a las tensiones del modelo [1].

Examinemos el caso del estado de tensión plano. Si se dirige un rayo luminoso sobre una lámina de material ópticamente sensible (fig. 84), ésta deja pasar la luz sin polarizarla, como todos los cuerpos isótropos, cuando falta la carga. En el estado cargado tal lámina se vuelve birrefringente y polariza el rayo luminoso incidente en dos planos mutuamente perpendiculares que coinciden con las direcciones de las tensiones principales. Estos dos rayos polarizados planos se propagan en el material

---

[1]) Este postulato es justo para cualquier problema plano de la teoría de la elasticidad dentro de los límites de la zona de un solo enlace; si la maqueta es representada por una zona de muchos enlaces (por ejemplo, en el caso de un anillo), la similitud puede ser no completa. Sin embargo, la exactitud de la solución es prácticamente suficiente.

con diferente velocidad y por eso salen de la placa con cierta diferencia de fase. La diferencia de velocidad depende de las tensiones y es proporcional a la diferencia de las tensiones principales $\sigma_1 - \sigma_2$ en el material de la maqueta en el lugar donde pasa el rayo. Para una lámina de espesor t la diferencia δ de marcha de los rayos (es decir, el retraso de un rayo respecto al otro) que atraviesan la placa perpendicularmente, se expresa del modo siguiente (ley de Wertheim):

$$\delta = t(\sigma_1 - \sigma_2)k, \qquad (64)$$

donde k es una constante que depende de las propiedades del material y la longitud de onda luminosa; esta magnitud se llama

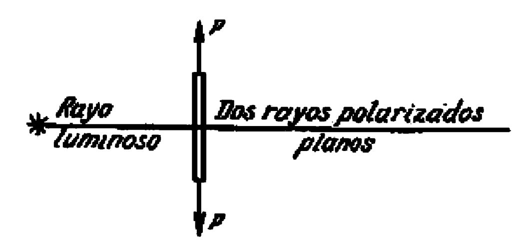


Fig. 84 | Probeta de un material ópticamente activo, cuando se halla en el estado tensional, polariza el rayo luminoso que la atraviesa en la dirección de los planos principales.

coeficiente óptico (coeficiente de Brewster). Para simplificar los razonamientos, suponemos que la luz es monocromática.

La diferencia $\sigma_1 - \sigma_2$ es igual a dos veces la tensión tangencial máxima $\tau_{máx}$, por eso podemos poner la fórmula (64) en la siguiente forma

$$\delta = 2t\tau_{máx}k \qquad (65)$$

o bien

$$\tau_{máx} = \frac{\delta}{2tk}. \qquad (66)$$

2. Polariscopio. Líneas isocromas. La esencia del método óptico de investigación de las tensiones se entiende fácilmente al analizar un instrumento llamado *polariscopio*. El esquema del polariscopio aparece en la fig. 85. Consta de dos polaroides o prismas de Nicol denominados polarizador (*I*) y analizador (*II*) del polariscopio.

Imaginémonos que un rayo luminoso pasa por el polarizador. Este rayo se hallará polarizado en el plano principal del polarizador (el plano *1,1* en la fig. 85, *b*). El rayo ha de alumbrar la pantalla *ab*. Haciendo girar ahora el analizador alrededor de la línea de marcha del rayo, podemos poner el plano principal *2,2*

del analizador perpendicular al plano principal $1,1$ del polarizador; entonces la pantalla debe estar oscura. El polariscopio, puesto en tal posición, se llama cruzado. La cruz $1,1 - 2,2$, formada por los planos principales del polarizador y del analizador, se llama cruz del polariscopio.

La probeta 3 que se halla cargada —una maqueta plana fabricada de una chapa de material ópticamente sensible de unos cuantos milímetros de espesor— se coloca en el polariscopio entre el analizador y el polarizador perpendicularmente a la dirección del rayo. En el estado no cargado la probeta casi no cambia la

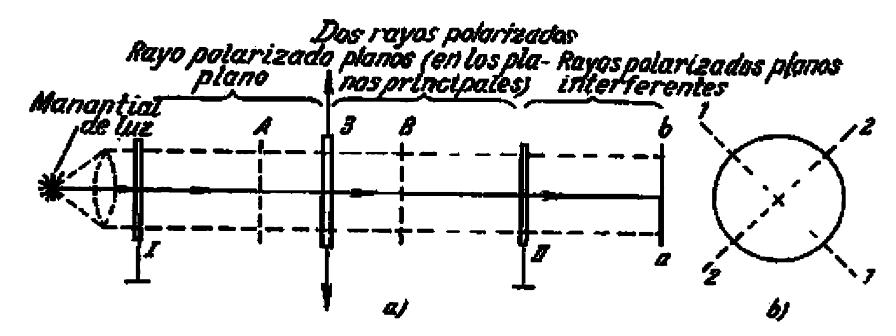


Fig. 85 | Esquema del polariscopio: *a*, esquema del recorrido del rayo luminoso; *b*, disposición de los planos principales del polarizador y analizador; $1-1$, plano principal del polarizador; $2-2$, plano principal del analizador; los planos $1-1$ y $2-2$ son mutuamente perpendiculares; el polariscopio se halla cruzado (oscuro), es decir, se encuentra en el estado de trabajo.

iluminación en la pantalla, y si el polariscopio fue puesto de manera cruzada, la pantalla seguirá estando oscura. Si la probeta se somete entonces a la acción de algunas cargas, en la pantalla aparece luz.

Aclaremos la causa de este fenómeno. Examinemos el elemento *abcd* (fig. 86) recortado de la probeta según la dirección de los planos principales. Supongamos que las oscilaciones que corresponden al rayo que sale del polarizador y cae sobre la probeta, suceden con una amplitud a en el plano $1-1$. Designemos por m y n las amplitudes de oscilaciones que corresponden a los rayos que salen de la probeta. Al caer sobre el analizador cruzado con el polarizador (la cruz punteada en la fig. 86 representa la cruz del polariscopio), estos rayos lo atraviesan con unas amplitudes m_1 y n_1. Si no existiera el retraso de un rayo respecto al otro (es decir, cuando $\delta = 0$ y, por consiguiente, cuando la diferencia de fase $\theta = 0$), la pantalla no tendría luz, porque las amplitudes m_1 y n_1 son de valor absoluto igual y de signo diferente; las

oscilaciones se anularían mutuamente. Lo mismo sucedería cuando $\delta = \lambda$, 2λ, 3λ, etc., siendo λ la longitud de onda luminosa (esto corresponde a las diferencias de fase $\theta = 2\pi$, 4π, 6π, 8π, etc.).

Para cualquier otro valor δ (distinto de 0, λ, 2λ, 3λ, etc.) en la pantalla habrá luz, porque las oscilaciones que se interfieren, al sumarse, darán oscilaciones que no son nulas. La iluminación máxima de la pantalla corresponde a la amplitud máxima de la oscilación resultante, o sea, a la diferencia de marcha

$$\delta = \frac{1}{2}\lambda, \quad 1\frac{1}{2}\lambda, \quad 2\frac{1}{2}\lambda, \text{ etc.} \tag{67}$$

La magnitud δ que determina la iluminación de la pantalla depende [véase la fórmula (64)] de la diferencia de las tensiones

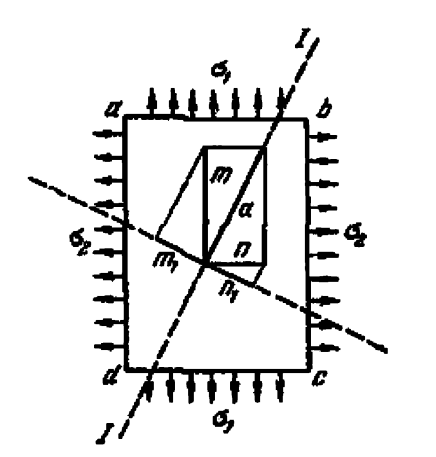


Fig. 86 Amplitudes de los rayos en el polariscopio: a, amplitud de las oscilaciones formando un rayo polarizado plano que sale del polarizador y cae sobre la probeta; m y n, amplitudes de las oscilaciones de los rayos que salen de la probeta $abcd$ y caen sobre el analizador; m_1 y n_1, amplitudes de dos oscilaciones interferentes que salen del analizador e iluminan la pantalla.

principales $\sigma_1 - \sigma_2$. Variando la carga y, con esto, la diferencia de las tensiones principales, observaremos un cambio de iluminación en la pantalla. Supongamos que en un momento dado del experimento la pantalla estaba oscura (o por el contrario, era el momento de mayor brillo); al cambiar la carga que actúa sobre la probeta, la oscuridad se repite cuando la diferencia de marcha δ se cambia en la longitud de onda λ. Denotemos por σ_{0t} el cambio correspondiente de la diferencia de las tensiones principales.

Al hacer pasar por la probeta un haz de rayos paralelos (en la fig. 85 los límites del haz se muestran con líneas punteadas), a todos los puntos de la probeta con iguales valores de $\sigma_1 - \sigma_2$ les corresponderán iguales valores δ y, por consiguiente, igual iluminación de la pantalla.

Tales puntos forman, por continuidad del campo de tensiones en la probeta, secuencias continuas, es decir, líneas o franjas llamadas líneas *isocromas* (véanse a continuación las figs. 90 y 92). Así, los puntos donde $\delta = 0$, λ, 2λ, etc. forman franjas

oscuras. Llamemos franja de 1er orden aquella que corresponde a $\delta = \lambda$; de segundo orden, la franja que corresponde a $\delta = 2\lambda$, etc. En la pantalla las franjas oscuras son separadas por las franjas claras, siendo gradual el paso de la oscuridad a la luz. El orden de dos franjas oscuras contiguas difiere en uno.

El incremento de la diferencia $\sigma_1 - \sigma_2$ de las tensiones principales que corresponde al cambio del orden de la franja en uno, denotado más arriba por σ_{0t} y llamado el valor de una franja de la lámina, se determina experimentalmente y es objeto de dicho experimento. Por lo tanto, en el punto 5 se describe la realización del ensayo.

Una vez obtenido el valor σ_{0t} de una franja para la lámina de espesor dado t, no es difícil calcular el valor σ_0 de una franja para la lámina del mismo material de espesor $t = 1$. De la fórmula (64) se deduce que si el espesor t de la muestra es reducido, por ejemplo, cierto número de veces, para obtener la misma diferencia de marcha δ será necesario aumentar la diferencia de las tensiones $\sigma_1 - \sigma_2$ igual número de veces. De aquí se desprende la proporcioón $t : 1 = \sigma_0 : \sigma_{0t}$. Es decir,

$$\sigma_0 = \sigma_{0t} t. \tag{68}$$

Como σ_{0t} se mide en kgf/cm^2 y t, en cm; σ_0 se mide en kgf/cm.

Llamaremos la magnitud σ_0 valor reducido de una franja, o simplemente el valor de una franja para el material dado. Este valor depende de las propiedades ópticas del material y muchas veces se llama la constante óptica del material. A veces se toma por constante óptica el valor de la tensión tangencial máxima igual a $\tau_0 = \sigma_0/2$.

En la tabla 39 aparecen los valores de la constante óptica y del límite de proporcionalidad para algunos materiales ópticamente activos.

Tabla 39

Material	Constante óptica $\sigma_0 = 2\tau_0$, kgf/cm	Límite de proporcionalidad, kgf/cm^2
Visjomlita	12	500
Baquelita	12	450
Celuloide	30—60	280—400
Vidrio	160—500	—

Los plásticos fenol-formaldehídos (visjomlita, baquelita, etc.) tienen la sensibilidad óptica más alta, por lo cual su utilización es más grande. Sin embargo, estos materiales se distinguen por el llamado efecto de borde: los bordes de la probeta, mecánica-

mente elaborados, siempre tienen en la pantalla franjas de interferencia, sobre todo después de una larga conservación. El celuloide no ofrece dicho efecto, pero tiene poca sensibilidad óptica. Además, se utilizan la resina gliceroftálica (" gliftamal") y sobre todo, la resina epoxídica ЭД-6 (ED-6), que tienen buenas propiedades ópticas y sirven para maquetas planas y de volumen [1]).

Una vez que se ha aclarado el valor de una franja y su orden, se puede calcular la diferencia de las tensiones normales principales (y de esta manera, la tensión tangencial máxima) igual para todos los puntos de la línea media de la franja dada:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{máx} = \sigma_{0l}n = \frac{\sigma_0}{l}n, \qquad (69)$$

donde n es el orden de la franja.

Y viceversa, conociendo las tensiones y el orden de una franja, es posible determinar su valor:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{n} l = \frac{2\tau_{máx}}{n} l. \qquad (70)$$

Si se hace uso de luz blanca en vez de monocromática, en la pantalla se observan franjas pintadas de colores del espectro luminoso, porque las longitudes de onda de los colores del espectro son distintas y se hallan en unas condiciones más favorables de interferencia (véanse las igualdades 67) para distintos valores de las tensiones. Todos los puntos de cualquier línea isocroma (franja de un color) corresponden a los puntos de la probeta con igual diferencia $\sigma_1 - \sigma_2$ de las tensiones principales y, por consiguiente, con iguales tensiones tangenciales máximas $\tau_{máx} = \frac{\sigma - \sigma_2}{2}$. Al cambiar las tensiones en algún punto de la probeta (si varía, por ejemplo, la carga exterior), ha de cambiar el color en el punto correspondiente de la pantalla. La aparición de un mismo color corresponderá cada vez al mismo incremento de la diferencia $\sigma_1 - \sigma_2$ que determina el valor de una franja de la línea isocroma. El valor de la línea isocroma se calcula por la misma fórmula (70).

El método descrito de determinación de la diferencia de las tensiones normales principales o de la tensión tangencial máxima por el cuadro de las líneas isocromas se llama *método de franjas*. El otro método, *visual*, se basa en la utilización de un instrumento óptico especial, mediante el cual se determina la diferencia de marcha δ, y luego por la fórmula (66) se calcula la tensión. Pero el método de franjas se emplea más.

---

[1]) *N. I. Prigorovski, A. K. Preis, M. S. Akutin* y *V. S. Gracheva*. Modelos de resina epoxídica ЭД-6 (ED-6) en el método de polarización óptica de investigación de las tensiones. «Zavodskaya laboratoria», 1957, N° 4.

3. Líneas isoclinas e isostáticas. Además de las franjas oscuras —líneas isocromas— descritas más arriba, en la pantalla aparecen franjas oscuras de otra índole que son líneas isoclinas. Expliquemos su aparición, utilización y el modo de quitarlas.

Si el plano *I—I* (fig. 86) de oscilación de los rayos que salen del polarizador es paralelo a alguno de los planos principales en el punto dado de la muestra (en otras palabras, si la cruz del polariscopio coincide con la cruz de los planos principales), el

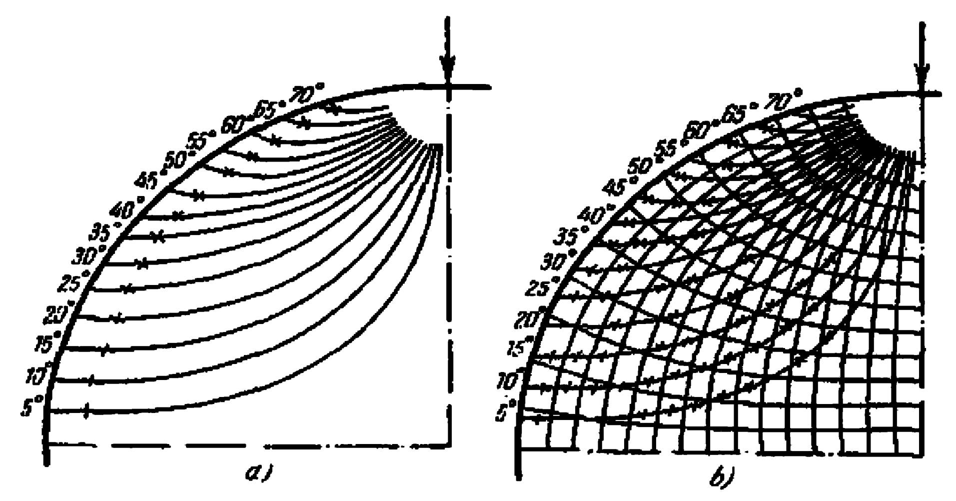


Fig. 87 | Investigación óptica de un disco redondo comprimido por el diámetro (se muestra un cuarto del disco): *a*, líneas isoclinas; *b*, construcción de las líneas isostáticas.

rayo no se descompone; en la pantalla, en este lugar, habrá un punto oscuro. Tales puntos forman en el campo continuo de tensiones unas líneas oscuras, llamadas líneas isoclinas. En todos los puntos de una línea isoclina las direcciones de los planos principales son paralelas a las direcciones de la cruz del polariscopio.

Haciendo girar la probeta cargada o, al revés, el polariscopio (cruzados el polarizador y el analizador) y dejando inmóvil la probeta, hemos de notar que la línea isoclina se desplaza sobre la imagen de la probeta; el sistema de las líneas isocromas se queda, por supuesto, invariable ya que es determinado solamente por las magnitudes δ.

A cada posición del polariscopio respecto a la muestra le corresponde una línea isoclina determinada (a veces son varias). En la fig. 87, *a* aparecen yuxtapuestas las líneas isoclinas para un disco redondo comprimido por dos fuerzas concentradas en la

dirección diametral. Las líneas isoclinas corresponden a los ángulos de 5°, 10°, 15°, etc. entre la cruz del polariscopio y la línea de acción de las fuerzas.

En cada línea isoclina se marcan con unas crucecitas las posiciones de la cruz del polariscopio que coincide con la cruz de los planos principales. Para todos los puntos de una línea isoclina la inclinación de las crucecitas es igual.

Poniendo una cantidad suficiente de las crucecitas (fig. 87, *b*) sobre las líneas isoclinas, podemos trazar una serie de curvas paralelas a los planos principales y, por consiguiente, a las tensiones principales. Estas curvas mutuamente perpendiculares no son sino líneas isostáticas o trayectorias de las tensiones principales que representan el campo de tensiones en la probeta.

Algunas veces las líneas isoclinas estorban la observación de las líneas isocromas. Para quitar las líneas isoclinas se interponen, por ejemplo, en el paso de los rayos en el polariscopio por ambos lados de la probeta (en la fig. 85, *a* se muestran con líneas punteadas y se denominan con letras *A* y *B*) unas láminas de mica de un espesor determinado orientadas con sus secciones principales a 45° con respecto a la cruz del polariscopio y cruzados entre sí. La mica polariza la luz que pasa por ella, en dos planos mutuamente perpendiculares. Es tal el espesor de estas láminas, que la diferencia de marcha de dos rayos a su salida es un cuarto de la longitud de onda de la luz monocromática utilizada; es decir, la diferencia de fase a la salida de la primera lámina es igual a $\pi/2$. Estos dos rayos polarizados planos con amplitudes iguales y diferencia de fase $\pi/2$ (al igual que $1\frac{1}{2}\pi$, $2\frac{1}{2}\pi$, etc.) componen un rayo que se llama polarizado circular, porque la oscilación resultante en la proyección sobre un plano perpendicular al rayo se reduce en este caso al movimiento circular (para una diferencia de fase distinta de $\frac{\pi}{2}$, $1\frac{1}{2}\pi$, $2\frac{1}{2}\pi$, ..., la polarización ocurre por una elipse). La otra lámina (*B*) de nuevo transforma la polarización circular en plana. Los rayos polarizados por el círculo no reaccionan en la dirección de los planos principales de la probeta, y en la pantalla no habrá líneas isoclinas.

En el caso de luz blanca la polarización circular se obtiene solamente para un color del espectro. Generalmente, el espesor de las láminas se calcula para luz amarilla, intermedia en el espectro, cuya longitud de onda es 0,5896 micrones (los demás colores, del espectro se hallarán polarizados por las elipses).

4. Polariscopio de espejo. Anteriormente se analizó el polariscopio de polaroides o prismas de Nicol. Tales polariscopios son cómodos para el trabajo y en la actualidad se utilizan mucho.

Pero tienen un campo de iluminación reducido, determinado por las dimensiones del polaroide. Existen polariscopios cuyo funcionamiento se funda en la polarización de la luz cuando ésta se reflecta de un espejo. Dos espejos de morblita hacen las veces de polarizador y analizador. Estos polariscopios son más voluminosos que los de polaroide, pero permiten la investigación de unas ma-

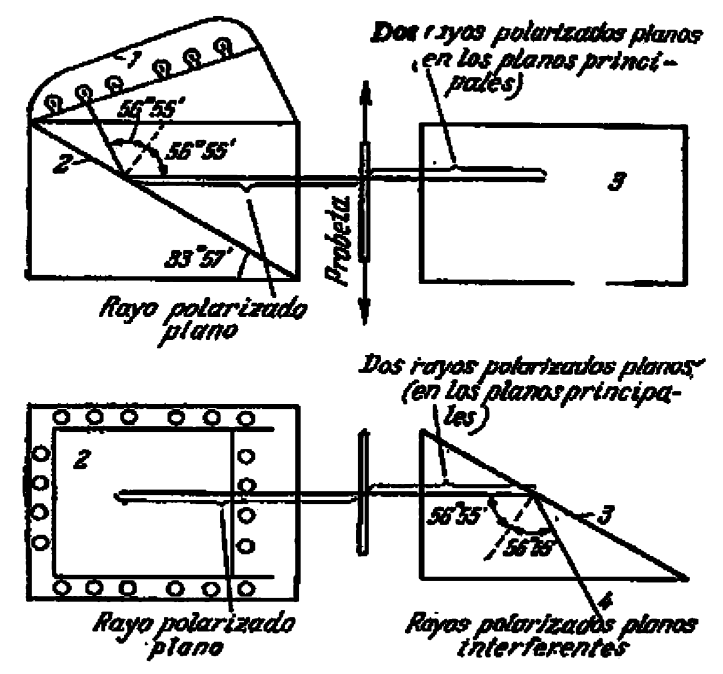


Fig. 88 | Esquema del polariscopio de espejo: *1*, tapa con bombillas de iluminación montadas; *2* y *3*, espejos de morblita.

quetas más grandes —hasta 0,5 m y mayores de sección transversal— sin tener que cambiarlas de lugar dentro del polariscopio.

El polariscopio de espejo de Belousov — Zaitsev, representado esquemáticamente en la fig. 88 en dos proyecciones, funciona como sigue: el manantial de luz provisto de múltiples bombillas se instala bajo una cúpula pintada de color blanco para mayor reflexión. Los rayos luminosos que caen sobre el espejo *2* (polarizador) bajo un ángulo igual al ángulo de polarización total (56° 55'), se reflectan polarizados en el plano vertical. El otro espejo igual *3* (analizador) orientado verticalmente bajo el mismo ángulo con respecto al rayo, extingue este rayo. La probeta se coloca, como siempre, entre polarizador y analizador. Al cargar

la probeta, igual que antes, el ojo del observador que se encuentra en el punto 6, notará la aparición de luz (es decir, de la línea isocroma) sobre la imagen de la probeta en el espejo 3.

5. Determinación del valor de una franja por medio del experimento de flexión pura. Investigando en el polariscopio la maqueta de una viga sometida a flexión pura, no es difícil determinar el valor de una línea isocroma (véase más arriba, el p. 2).

En la fig. 89 se ve el esquema de carga de una viga durante el ensayo de flexión pura. La fuerza concentrada P se transmite sobre la viga ensayada por medio de una grapa de acero ab, a lo largo de la cual la viga experimenta la flexión pura. La viga se fabrica de un material ópticamente sensible de un espesor cons-

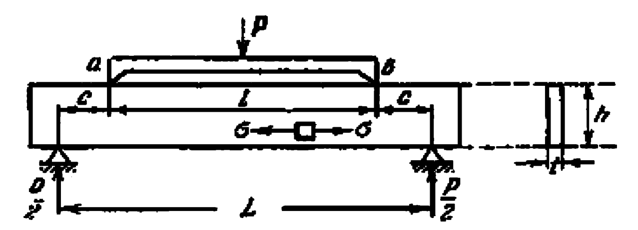


Fig. 89 | Esquema de carga de una viga para el ensayo de flexión pura.

tante t. Su longitud L es de 10 a 20 cm según las dimensiones del polariscopio. Durante la flexión pura no surgen tensiones tangenciales en las secciones transversales y tangenciales de la viga, o sea, las tensiones normales en estos planos son principales. Una de ellas, σ_2 (vertical), es igual a cero. En consecuencia, la diferencia de las tensiones principales $\sigma_1 - \sigma_2$ para este caso será representada por una sola tensión σ_1 paralela al eje de la viga y determinada por la fórmula conocida

$$\sigma = \frac{M}{I} y.$$

En la fig. 89 se ilustra el estado de tensión de un elemento escogido en la zona inferior de la viga, sometida a tracción.

A lo largo de la viga, en la zona de flexión pura, las tensiones no cambian porque el momento flector M es constante, y por la altura de la sección las tensiones cambian según una ley lineal. Por eso las líneas isocromas (fig. 90) en el tramo de flexión pura no son sino unas franjas rectas paralelas al eje de la viga, ubicadas a igual distancia entre sí. Las cifras puestas al lado de cada franja muestran su orden. El eje neutro de la viga se marca con cero. Dos franjas de primer orden contiguas al eje neutro, ubicadas una abajo y otra arriba, corresponden a $\delta = \lambda$, siendo λ la

longitud de onda de la luz. La tensión aquí es igual al valor de una franja σ_{0t}. Las dos franjas siguientes de segundo orden corresponden a una diferencia de marcha 2λ y, claro está, a una tensión dos veces mayor $2\sigma_{0t}$, etc.

Hallamos el valor de una franja, dividiendo $\sigma_{máx}$ entre el número m de las franjas (o intervalos entre ellas):

$$\sigma_{0t} = \frac{\sigma_{máx}}{m}.$$

El número m puede ser fraccionario, si el intervalo superior es incompleto.

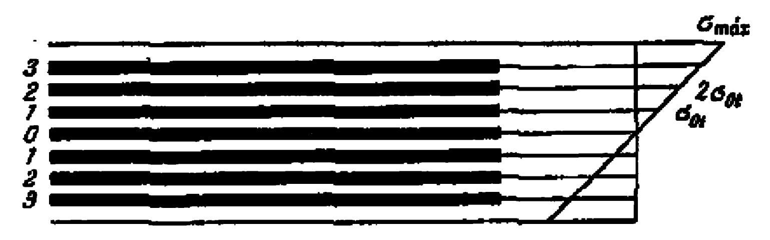


Fig. 90 | Zona de flexión pura de una viga se representa en el polariscopio por un campo uniforme de franjas paralelas, líneas isocromas; a esta zona le corresponde el gráfico rectilíneo de las tensiones (a la derecha).

La magnitud $\sigma_{máx}$ se determina por la fórmula (71)

$$\sigma_{máx} = \frac{M}{W},$$

donde (véase la fig. 89)

$$M = \frac{P}{2} c,$$

$$W = \frac{th^2}{6}.$$

La forma de inscripción durante la realización del experimento se da en la tabla 40.

Si el efecto de borde es grande, el extremo de la probeta no se examina; se mide el paso promedio d de las franjas en la parte media de la probeta, y el valor de una franja se calcula por la fórmula siguiente:

$$\sigma_{0t} = \frac{M}{J} d$$

o bien

$$\sigma_0 = t \frac{M}{J} d,$$

Tabla 40

Carga P kgf	Momento flector $M=\frac{P}{2}c$, kgm	Módulo de la sección de la viga $W=\frac{th^2}{6}$, cm³	Tensión máxima $\sigma_{máx}=\frac{M}{W}$, kgf/cm²	Número de los intervalos, m	Valor de una franja $\sigma_{0t}=\frac{\sigma_{máx}}{m}$, kgf/cm²	Valor reducido de una franja $\sigma_0=\frac{\sigma_{máx}t}{m}$ kgf/cm

donde $J = th^3/12$ es el momento de inercia de la sección de la probeta.

El valor obtenido de una franja σ_0 corresponde a una lámina de espesor igual a uno (1 cm), y se mide en kgf/cm.

EXPERIMENTO 27. DETERMINACIÓN DE LAS TENSIONES DE BORDE EN LA LUZ POLARIZADA

1. Datos generales. En el problema anterior de flexión pura de la viga (experimento 26, punto 5), una de las tensiones principales es nula, lo que ha facilitado la solución de dicho problema con el método óptico. Semejante estado de tensión siempre existe cerca del borde libre de una lámina cargada solamente en el plano medio. Para cerciorarse de esto, examinemos un elemento infinitamente pequeño cerca del borde libre de una lámina (fig. 91). Las tensiones tangenciales, de acuerdo con la ley de reciprocidad, tienen que ser de valor absoluto igual en todas las aristas del elemento. Sin embargo, en la arista libre son iguales a cero; es decir, se puede considerar que las tensiones tangenciales son nulas en las demás aristas de un elemento infinitamente pequeño. Por el equilibrio del elemento deducimos que en la arista opuesta a la libre no hay tensiones normales, es decir, son posibles solamente las tensiones normales paralelas a la arista libre mostradas en la fig. 91, *d*. De esta manera, la diferencia de las tensiones principales en los bordes de la viga se representa por una sola tensión, la cual se determina completamente del cuadro de las franjas.

En el presente trabajo se propone construir, haciendo uso del método óptico, los gráficos de tensiones normales en los bordes superior o inferior de los voladizos y luego determinar los valores del coeficiente de concentración de las tensiones en los lugares donde cambia bruscamente la altura de la sección de la viga. Para esclarecer la dependencia entre el coeficiente de concentración y

la forma del ángulo de acuerdo, se examinan distintos casos de conjugación: bajo ángulo obtuso, recto y con curva.

2. Construcción de los gráficos de las tensiones de borde por líneas isocromas. Estudiemos las concentraciones de tensiones en los ángulos de acuerdo. En la fig. 92 están representadas las líneas isocromas para un voladizo con el ángulo de acuerdo recto (el extremo del voladizo que porta la carga se encuentra a la derecha fuera de la figura). Numeremos las franjas por el borde superior del voladizo según su orden, partiendo de la línea media de la viga. La tensión en el punto donde aparece en el borde la franja que tiene el orden *i*, es igual a σ_{0i}. En el punto de aparición de la franja *2* la tensión

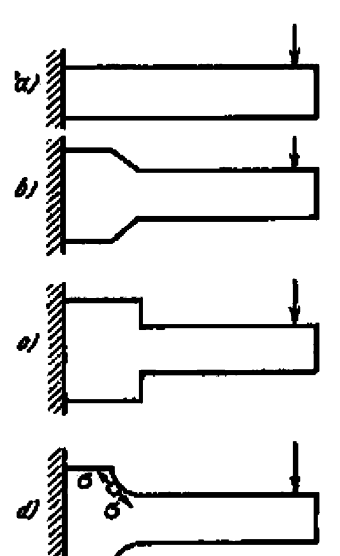


Fig. 91 | Tipos estudiados de las vigas.

es $2\sigma_{0i}$, etc. Colocando a una escala estas tensiones, como se muestra en la fig. 92, construimos el gráfico de las tensiones de borde.

El gráfico de las tensiones de borde es rectilíneo en toda su extensión, menos el tramo cerca del ángulo. Aquí se observa un crecimiento rápido de las tensiones. Por el coeficiente α_c de concentración de las tensiones se entiende la relación de la tensión máxima efectiva $\sigma_{máx}$ en el lugar de concentración a la tensión nominal σ_{nom}, obtenida teóricamente sin contar con la concentración, es decir,

$$\alpha_c = \frac{\sigma_{máx}}{\sigma_{nom}}. \tag{72}$$

De acuerdo con la teoría de flexión de las vigas, la ley de cambio de la tensión de borde $\sigma = M/W$, en el caso de un voladizo de sección constante, cumple la ley de cambio del momento flector, y para el caso dado se representa por una recta. En la

fig. 92 dicha recta se muestra con líneas punteadas. Se puede obtener la relación incógnita $\alpha_c = \sigma_{máx}/\sigma_{nom}$ como la relación de las ordenadas correspondientes tomadas del dibujo. Para nuestro caso $\alpha_c = 1,5$. Para un ángulo obtuso α_c es menor; para una curva α_c es igual o se aproxima a uno; es decir, en este caso la concentración de tensiones no se observa.

En los experimentos 26 y 27 fue expuesto el método de determinación de la diferencia de las tensiones principales $\sigma_1 - \sigma_2$. Se puede hallar la suma de estas mismas magnitudes midiendo el

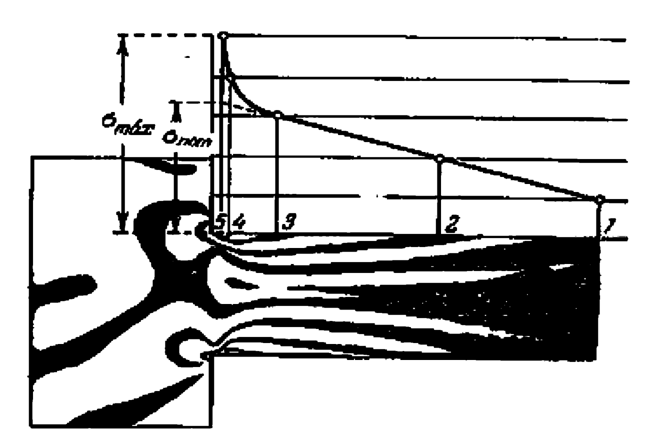


Fig. 92 | Determinación del coeficiente de concentración α_c por el gráfico de las tensiones de borde.

cambio del espesor de la maqueta en un lugar dado, que se expresa teóricamente así: $\varepsilon = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$. Conociendo la diferencia y la suma de las tensiones principales, es posible calcular las propias tensiones. La medición del espesor de la maqueta se efectúa por medio de unos instrumentos, cuya descripción se da en manuales especiales.

EXPERIMENTO 28. DETERMINACION DE LAS TENSIONES NORMALES POR EL METODO DE MUARE

1. Campo homogéneo de tensiones. Tracemos sobre la superficie de una probeta plana (fig. 93, *a*) un sistema de rayas rectas *I* equidistantes (fig. 93, *b*) con un paso $d = 0,1 - 0,01$ mm. Estas rayas le dan a la superficie de la muestra un tono gris y cada una por separado es invisible. Luego sometamos la probeta a tracción con una fuerza P; el paso de las rayas *II* aumentará (fig. 93, *b*): $d_1 > d$. Para determinar la deformación ε_y, pongamos sobre la probeta traccionada un vidrio con un sistema de rayas

de patrón *I* (análogo al sistema de rayas trazado sobre la probeta antes de su deformación) de tal manera, que alguna raya del vidrio aplicado coincida con la línea de empotramiento *A—A* de la probeta. Al superponer el sistema *I* sobre el sistema *II*, aparece un nuevo sistema de rayas de muaré *III*, que puede distinguirse bien a simple vista, con un paso *L* mucho más grande (fig. 93, *b*). En el caso examinado de una deformación homogénea, aparecerá un sistema de rayas rectas paralelas equidistantes. En la fig. 93 se ve que las rayas oscuras de muaré *III* se forman en

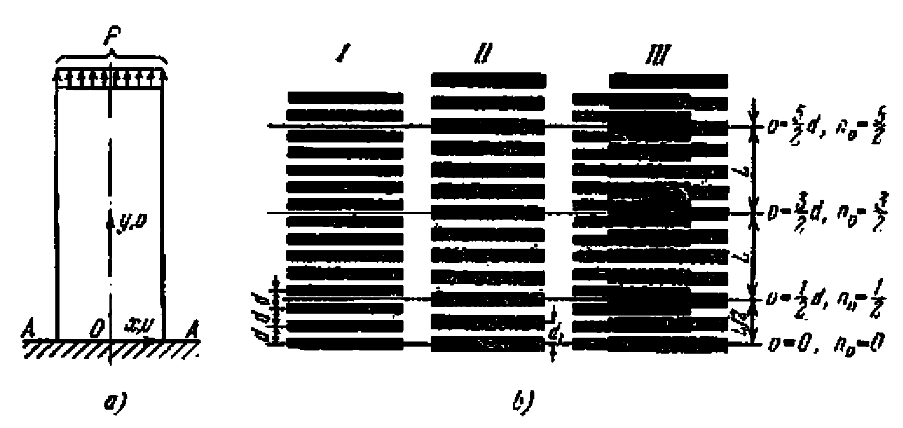


Fig. 93 | Formación de las rayas de muaré: *a*, probeta, *b*, rayas antes de la deformación (I), después de la deformación (II), después de superponer el sistema I sobre el II (III).

el lugar donde los intervalos claros del sistema *I* se hallan cubiertos por las rayas oscuras del sistema *II*. A la raya de muaré más próxima del empotramiento (*A—A*) le corresponde el desplazamiento v de los puntos de la probeta a lo largo del eje y bajo la acción de la fuerza *P*, igual a la mitad del paso del sistema de rayas de patrón, es decir, $v = d/2$. A la raya siguiente le corresponde un desplazamiento igual a $\frac{3}{2}d$, luego $\frac{5}{2}d$, etc.; durante la transición de una raya de muaré a otra contigua, el desplazamiento cambia en una cantidad igual al valor del paso de la retícula de patrón.

El desplazamiento de un punto arbitrario de la probeta

$$v = nd, \tag{73}$$

donde n es el número de orden de la raya de muaré. Para el caso dado n es un número fraccionario: $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, etc.

2. Campo heterogéneo de tensiones. El cuadro de muaré en la fig. 93 es el resultado de una deformación homogénea, cuando

ε_y = const. En el caso de $\varepsilon_y = f(y)$, las rayas de muaré siguen siendo paralelas al eje x, pero ya no son equidistantes. En el caso general de $\varepsilon_y = f(x, y)$ el cuadro de muaré no es sino un campo de rayas que no se intersecan, pero tampoco son parale-

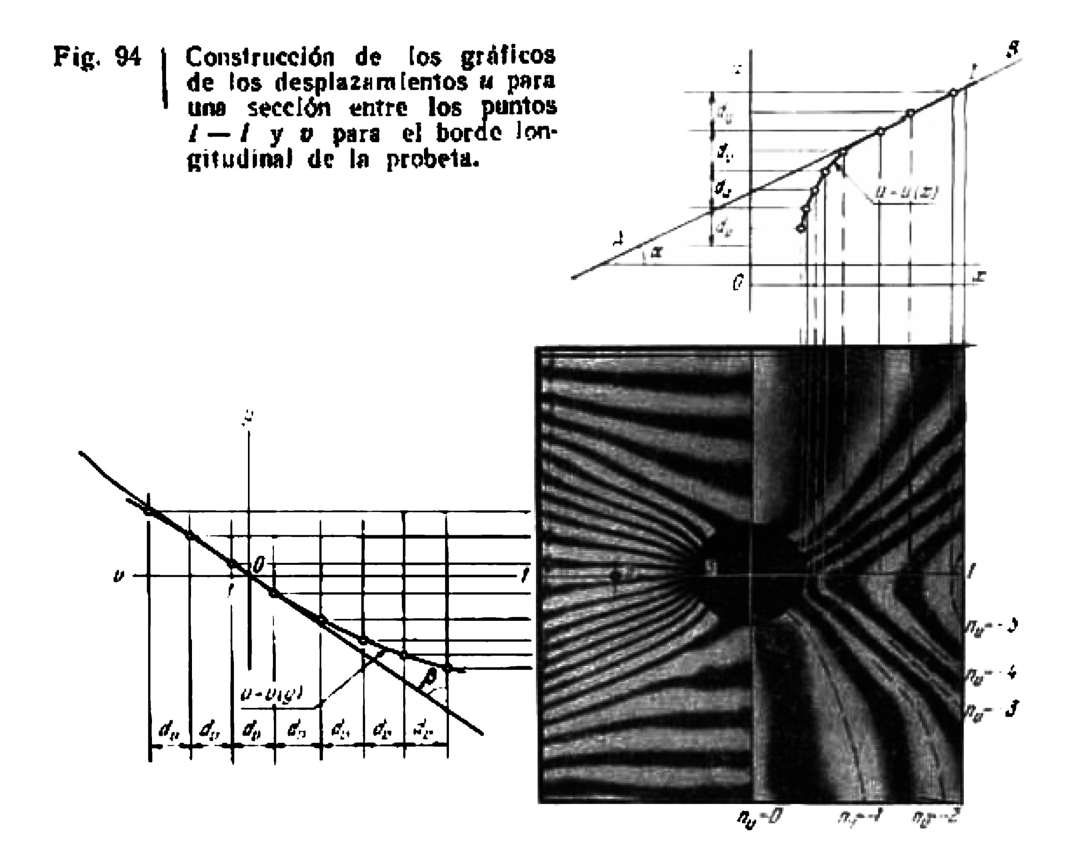


Fig. 94. Construcción de los gráficos de los desplazamientos u para una sección entre los puntos $l - l$ y v para el borde longitudinal de la probeta.

las. Todos los razonamientos anteriores también son válidos al examinar un tramo pequeño dx a lo largo del eje x.

En la fig. 94 se muestra una lámina con un agujero redondo (véase el experimento 10). En la mitad derecha de la probeta fue trazado un sistema de rayas longitudinales (verticales) con un paso d_u = 0,020 mm. La superposición del vidrio de patrón sobre la probeta deformada da como resultado el cuadro de muaré con u = const, cuyas rayas presentan el campo de distribución de los desplazamientos $u = u(x, y)$. Análogamente, para obtener v se empleó el sistema de rayas transversales (sobre la mitad izquierda de la muestra) con un paso d_v = 0,023 mm. La foto se da a escala $1 : k_l$ (k_l = 0,5).

Las deformaciones ε_x y ε_y se expresan por medio de los incrementos du y dv de los desplazamientos del modo siguiente:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{d_u}{L_u}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \approx \frac{d_v}{L_v}, \tag{74}$$

donde L_u y L_v son las distancias entre las rayas vecinas de muaré.

Determinemos a base del cuadro de rayas de muaré los valores de ε_x para una sección entre los puntos $I-I$. La franja clara longitudinal $u =$ const, que coincide con el eje y de simetría de la probeta, será una raya de orden cero $n_u = 0$. A una raya clara contigua le corresponde un desplazamiento $u = -d_u$ de los puntos de la probeta en la dirección según x igual a la magnitud del paso de la retícula de patrón $d_u = 0{,}020$ mm (el signo "—" corresponde al desplazamiento a la izquierda). A una raya siguiente le corresponde un desplazamiento $u = -2d_u$, etc. Sobre la foto del cuadro de muaré $u = u(x, y)$ trazamos una serie de rectas horizontales con una distancia d_u tomada a escala $1:k_2$ ($k_2 = 0{,}002$), sobre las cuales trasladamos los puntos de intersección de las rayas de muaré con el eje $I-I$, tomando en consideración el orden de dichas rayas. Uniendo los puntos obtenidos con una recta, construimos el diagrama de la dependencia $u = u(x)$. El ángulo α de inclinación, con respecto al eje x, de la tangente AB de la curva en su punto dado determina la magnitud $\partial u/\partial x$ o, según la primera de las expresiones (74), la magnitud de la deformación ε_x en el lugar dado. Por ejemplo, en el punto I

$$\varepsilon_x^{(I)} = -(\operatorname{tg} \alpha)\frac{k_2}{k_1} = -0{,}55\frac{0{,}002}{0{,}5} = -0{,}00220.$$

Obtenemos análogamente los valores de ε_y, al construir el diagrama de la dependencia $v = v(y)$, como se ilustra en la fig. 94, a la izquierda. El ángulo β de inclinación de la tangente de la curva en el punto dado con respecto al eje y determina la magnitud ε_y. Por ejemplo, en el punto I

$$\varepsilon_y^{(I)} = (\operatorname{tg} \beta)\frac{k_3}{k_1} = 1{,}30\frac{0{,}0023}{0{,}5} = 0{,}00598,$$

donde $k = 0{,}0023$ es la escala por el eje v.

3. Técnica del experimento. Como durante la investigación por el método de muaré sobre la superficie de la probeta se pone una retícula fina, las exigencias para esta superficie son muchas. Las más esenciales de ellas son las siguientes: tener una superficie plana, de gran finura (▽8 — ▽9). El trazado del sistema de rayas paralelas sobre la superficie de la probeta se efectúa transponiéndolo del patrón (fabricado de un vidrio no orgánico) por medio de impresión fotográfica por contacto.

Durante el ensayo se pone sobre la probeta, que se encuentra en los mandriles de la máquina de ensayo, el patrón y se lo fija con sujetadores. Para hacer el cuadro de muaré más contrastante, sobre el patrón se vierte previamente aceite de vaselina. La falta de las rayas de muaré sirve de control sobre la justeza de colocación de la retícula de patrón (el "testigo"). Al cargar la probeta, surge y se observa visualmente el cuadro de muaré descrito anteriormente.

A veces la densidad de las rayas de muaré es insuficiente para determinar las deformaciones con precisión. Para aumentar la densidad de las rayas de muaré, siendo invariable el estado de deformación del objeto, puede ser utilizado el llamado muaré diferencial. Sobre la probeta se pone la retícula con una densidad n_{pr}; en calidad de retícula-testigo se utiliza una de densidad n_t un poco mayor en el caso de la compresión, y menor en el caso de la tracción. Así pues, sobre el campo deformado, ocasionado por la carga de la probeta, se coloca "el campo deformado" homogéneo ficticio provocado por la no coincidencia de las densidades de las retículas. La deformación verdadera es la siguiente:

$$\varepsilon = \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{fict}, \qquad (75)$$

siendo ε_{cm} una deformación hallada directamente en el cuadro de muaré (sin tomar en cuenta la no coincidencia de densidades de las retículas), y

$$\varepsilon_{fict} = \left(\frac{1}{n_m} - \frac{1}{n_t}\right) n_t. \qquad (76)$$

4. **Determinación de las tensiones.** A base de las deformaciones conocidas ε_x y ε_y se puede determinar las tensiones según las fórmulas (véase las fórmulas (9) en la pág. 84)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y); \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x). \qquad (77)$$

Sigamos la interpretación del cuadro de muaré de los desplazamientos u y v (véase la fig. 94) que ha sido obtenido utilizando el muaré diferencial. El paso de las rayas de la retícula-testigo en el lado derecho de la probeta es $d_{u\,t} = 0{,}020016$ mm; en el izquierdo, $d_{v\,t} = 0{,}02296$ mm. Por la fórmula (76), tomando en consideración que $d = 1/n_t$, obtenemos lo siguiente:

$$\varepsilon_{u\,fict} = \frac{0{,}020000 - 0{,}020016}{0{,}020016} = -0{,}00080,$$

$$\varepsilon_{v\,fict} = \frac{0{,}02300 - 0{,}02296}{0{,}02296} = -0{,}00160,$$

Para el punto *1* por la fórmula (75)

$$\varepsilon_x^{(1)} = -0{,}00220 + 0{,}00080 = -0{,}00140,$$
$$\varepsilon_y^{(1)} = 0{,}00598 - 0{,}00160 = 0{,}00438$$

y por la segunda de las fórmulas (77) para $E = 6700$ kgf/mm² y $\mu = 0{,}33$

$$\sigma_y^{(1)} = \frac{6700}{1 - 0{,}33^2}(0{,}00438 - 0{,}33 \cdot 0{,}00140) = 29{,}5 \text{ kgf/mm}^2.$$

Análogamente deducimos para el punto *2* $\sigma_y^{(2)} = 58{,}0$ kgf/mm².

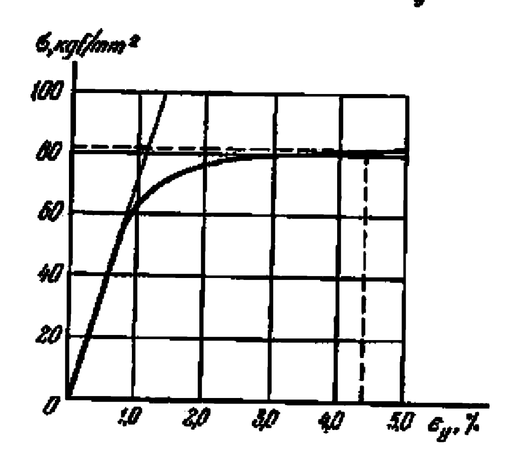


Fig. 95 | Diagrama de tracción del material de la probeta.

En la fig. 95 se da el diagrama de tracción del material de la probeta (aleación a base de aluminio de alta resistencia). Los puntos examinados *1* y *2* se hallan en la zona de las deformaciones elásticas. El punto *3* se halla, por lo visto, en la zona de las deformaciones plásticas. La distancia entre las rayas vecinas por la vertical en el punto *3*, tomando en cuenta la escala de la foto

$$L_0^{(3)} = 1{,}0 \cdot 0{,}5 = 0{,}5 \text{ mm}.$$

Por la segunda de las fórmulas (77)

$$\varepsilon_{y\,\text{cin}}^{(3)} = \frac{0{,}023}{0{,}5} = 0{,}0460$$

y por la fórmula (75)

$$\varepsilon_y^{(3)} = \varepsilon_{y\,\text{cin}}^{(3)} - \varepsilon_{y\,\text{fict}} = 0{,}0460 - 0{,}016 = 0{,}0444.$$

En el diagrama de tracción (véase la fig. 95) se ve que la deformación obtenida $\varepsilon_y^{(3)}$ es plástica. Como el punto *3* se ubica cerca del borde libre del agujero ($\sigma_x = 0$), en este lugar se presenta el estado de tensión uniaxial (véase el experimento 27, punto 1). Haciendo uso del diagrama de tracción directamente, obtenemos para $\varepsilon_y = 0{,}0444 = 4{,}44\%$ la tensión en el punto *3* $\sigma_y^{(3)} = 80{,}5$ kgf/mm². El diagrama de las tensiones σ_y para la sección *I—I* se muestra en la fig. 96.

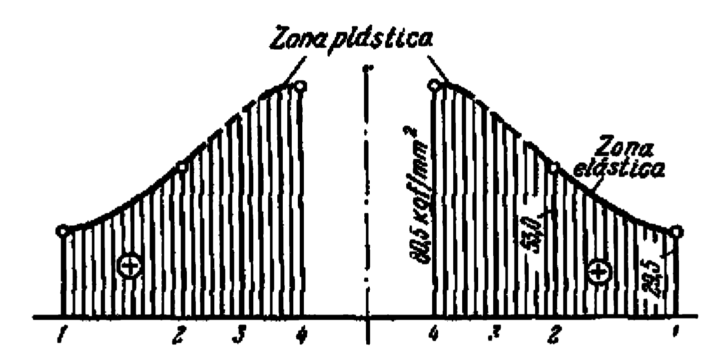


Fig. 96 | Gráfico de las tensiones normales en la sección transversal de la probeta por el centro del agujero.

EXPERIMENTO 29. ESTUDIO DE FLEXION DE UNA LAMINA POR EL MÉTODO DE MUARÉ

1. Datos generales y teóricos. La observación de las rayas de muaré durante la flexión de una lámina se realiza mediante una instalación especial que consta de una pantalla *1* (fig. 97) encorvada según una superficie cilíndrica de radio *R*, una cámara fotográfica con el objetivo *2* y la película *3* y la lámina investigada *4*. Sobre la superficie de la pantalla *1*, paralelamente a su generatriz, se pone un sistema de rayas negras muy finas con un paso *d* (la trama), dando a la superficie de la lámina ensayada *4* la capacidad de reflexión. La pantalla tiene un dispositivo para moverla alrededor del eje *z*, que pasa por los centros del objetivo y la lámina.

Al principio se fotografía en la película *3* la reflexión de la trama de la lámina no cargada (retícula-testigo). Una vez cargada, la lámina se encorva y las normales *N* a su superficie (al igual que las tangentes) se declinan en todos los puntos. La reflexión de la trama se hace alterada. Se fotografía de nuevo en la misma película *3*. Una vez que se ha revelado el negativo, las rayas del testigo coinciden con las rays alteradas de la trama a causa de la flexión de la lámina, lo que ofrece el cuadro de muaré.

Pero se forma de un modo diferente y está sujeto a deformaciones distintas a las del caso de un problema plano (experimento 28).

Antes de aplicar la carga, el punto M_1, tomado en una raya arbitraria A de la trama (véase la fig. 97), se refleja por el punto K de la lámina en el punto K' del negativo sobre una raya no alterada A_r (de la retícula-testigo).

La raya oscura A de la trama en el negativo se pone clara después de su revelado, pero en la fig. 97 su reflexión A_r es

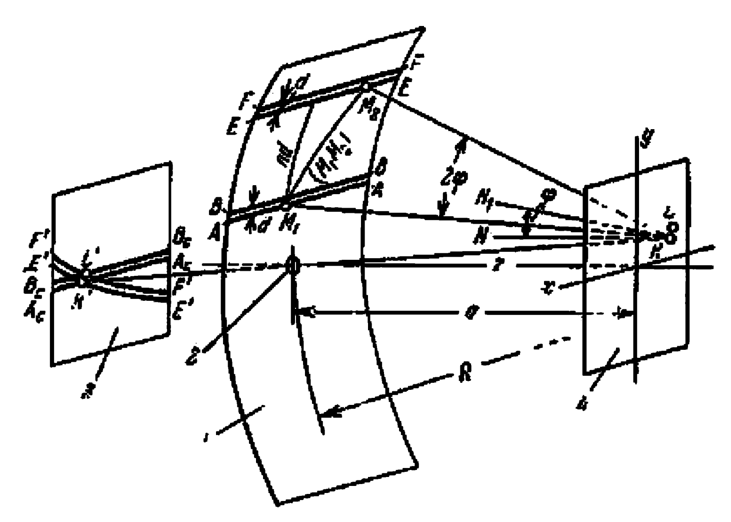


Fig. 97 | Esquema principal de la instalación para obtener rayas de muaré por medio del fotografiado: *1*, pantalla; *2*, objetivo; *3*, negativo; *4*, lámina investigada

oscura, igual como aparece en la reproducción positiva. Por eso, en adelante, en vez del negativo hemos de emplear la reproducción con una imagen verdadera de la trama reflejada.

Después de haber sido cargada, cuando la lámina se encorva, su superficie en el punto K se inclina a un ángulo φ (la normal N se desvía hacia la posición N_1). Ahora en el punto K' de la reproducción (más exactamente, del negativo) se reflejará de K otro punto M_2 sobre otra raya E de la trama. La raya alterada E' será la reflexión de la última en la reproducción.

En el caso generalizado, el ángulo $\varphi = \varphi(x, y)$ es sólido. Su componente

$$\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y} = w_y$$

la determina la proyección del arco (M_1M_2) sobre el plano yOz perpendicular a las rayas de la trama. Esta proyección es igual

a la distancia entre los centros de las rayas A y E de la trama. Se mide con el número n de intervalos claros entre A y E multiplicado por el paso d de las rayas, o sea, $AE = nd$.

Resulta que si la relación del radio R de la pantalla respecto a la distancia a (véase la fig. 97) entre la lámina y el objetivo se aproxima a $R/a \approx 3$, para determinar w_y se puede hacer uso, con un grado suficiente de exactitud, de la relación

$$w_y = n\frac{d}{2a} = n\lambda. \tag{78}$$

Una dependencia análoga se obtiene para la componente $\varphi_x = \partial w/\partial x = w_x$. Con este fin es necesario hacer girar 90° la pantalla alrededor del eje z y ubicar las rayas de la trama perpendicularmente al plano xOz. Entonces la proyección del arco entre los puntos nuevos M_{1x} y M_{2x} sobre el plano xOz, igual a un número nuevo m de intervalos claros entre las rayas nuevas A_x y E_x, viene dada por la fórmula

$$w_x = m\frac{d}{2a} = m\lambda. \tag{79}$$

El punto K' (véase la fig. 97) de intersección de la raya A_r con otra alterada E' en la reproducción determina la posición del punto K de la lámina, donde el ángulo de inclinación vale w_y.

Igual inclinación w_y la obtiene la superficie de la lámina en el punto L (uno de los puntos contiguos al punto K), que se determina sobre la reproducción por la intersección de L' de la raya B_r del testigo (contigua a A_r) con la raya alterada F' (contigua a E') porque la distancia $BF = AE = nd$.

Pasando de manera semejante de una raya a otra, hallamos el lugar geométrico de los puntos con iguales inclinaciones de la superficie de la lámnia w_y = const.

Las líneas de ángulos iguales w_y pasan por el centro de las rayas de muaré. Es fácil cerciorarse de esto en una imagen ampliada de la reproducción revelada (fig. 98) después de fotografiar dos veces (antes y después de la carga) la lámina que refleja la trama. Supongamos que sus rayas se ubican perpendicularmente al eje y. Denotemos por *1*, *2*, *3*, ... las rayas oscuras de la retícula-testigo en la reproducción (corresponden a las rayas oscuras de la trama), y por *1'*, *2'*, *3'*, ... las mismas rayas después de haberlas cargado (rayas alteradas). Las intersecciones de las rayas homónimas del testigo y de la trama alterada, o sea, *1* con *1'*, *2* con *2'*, *3* con *3'*, ... se encuentran sobre la línea O que pasa a través de las diagonales de los paralelogramos claros formando la raya clara de muaré, es decir, por el medio de dicha raya. Además, el número de intervalos claros entre rayas homónimas $n = 0$ y por tanto, en estos puntos $w_y = 0$ según la fór-

mula (78). Esto quiere decir que por la línea *O* la superficie de la lámina no obtuvo inclinación a lo largo del eje y.

La siguiente raya clara del muaré pasa por la línea *I* uniendo las intersecciones de las rayas *2* con *1'*, *3* con *2'*, *4* con *3'*, ... Entre estas rayas se encuentra un intervalo claro (la distancia entre sus centros siempre es igual al paso d), es decir, $n = 1$. Por la fórmula (78), el ángulo de inclinación de la superficie de la lámina con respecto al eje y en los puntos de la línea de muaré *I* es $w_y = 1\frac{d}{2a} = \lambda$.

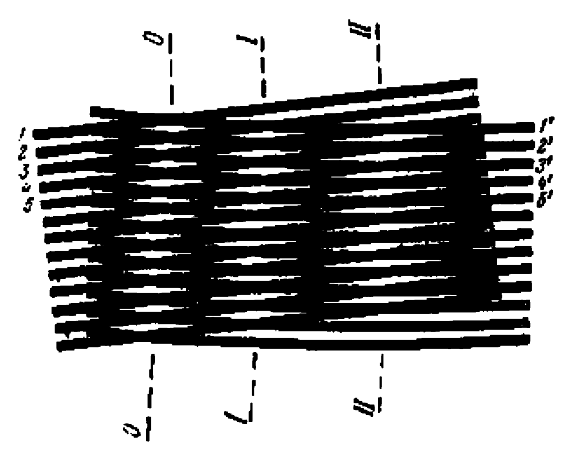


Fig. 98 | Reproducción aumentada después de doble fotografiado.

Luego, la línea de muaré *II* une las intersecciones de las rayas *3* con *1'*, *4* con *2'*, *5* con *3'*, ..., entre las cuales ya se encuentran dos intervalos claros, o sea, $n = 2$ y $w_y = 2\frac{d}{2a} = 2\lambda$. etc. Al pasar de una raya de muaré a otra vecina, el ángulo de inclinación w_y de la superficie de la lámina cambia en una magnitud

$$\lambda = \frac{d}{2a}, \qquad (80)$$

llamada valor de una división del campo de rayas de muaré durante la flexión. El número n de intervalos claros entre las rayas de la trama que se intersecan en la reproducción, igual al número de pasos d entre los puntos M_1 y M_2 (véase la fig. 97), no es sino el orden de una raya de muaré. El orden de las rayas claras de muaré de la reproducción se expresa por números enteros: $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ El orden de las rayas oscuras de muaré difiere la mitad y se expresa por números quebrados: $n = \pm 0{,}5, \pm 1{,}5, \pm 2{,}5, \ldots$

Todo lo dicho respecto al ángulo w_y se refiere totalmente al ángulo w_x, haciendo girar para esto la pantalla a 90° y ubicando las rayas de la trama perpendicularmente al eje x. El valor de una división permanece igual a $\lambda = d/2a$, y el orden de las rayas dará, según la fórmula (79), un número nuevo m, que sigue siendo expresado para las rayas claras por números enteros y para las oscuras, por números quebrados.

La posición de la raya inicial (nula) de muaré, al igual que los signos del orden de las rayas se establecen partiendo de las condiciones frontera y a base de su análisis cualitativo. Este

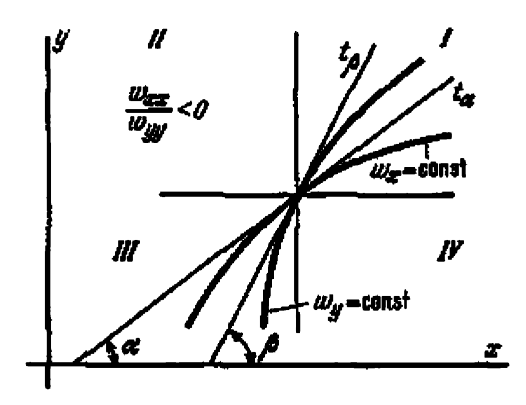


Fig. 99 | Intersección de las líneas de muaré $\omega_x = \text{const}$ y $\omega_y = \text{const}$.

análisis se hace por medio de las fórmulas compuestas para el punto de intersección de dos líneas de muaré (fig. 99), o sea, $w_x = \frac{\partial w}{\partial x} = \text{const}$ y $w_y = \frac{\partial w}{\partial y} = \text{const}$ en la siguiente forma:

$$w_{xx} \cos\alpha + w_{xy} \operatorname{sen}\alpha = 0, \tag{81}$$

$$w_{yx} \cos\beta + w_{yy} \operatorname{sen}\beta = 0, \tag{82}$$

$$K = w_{xy}^2 (\operatorname{tg}\alpha \operatorname{ctg}\alpha - 1). \tag{83}$$

Aquí

$$w_{xx} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad w_{yy} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad w_{xy} = w_{yx} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \, \partial y}$$

son curvaturas de la superficie de la lámina; α y β son ángulos entre las tangentes t_α y t_β y la dirección positiva del eje x; K es la curvatura de Gauss de la superficie de la lámina en el punto dado.

Es posible hallar las flechas de la lámina en cualquier punto P de la recta paralela al eje y (o al eje x) por la fórmula siguiente

utilizando el cuadro de muaré:

$$w_p = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{p} (w_{i-1,\,y} + w_{i,\,y}) \Delta y_i, \tag{84}$$

donde $w_{i,\,y}$ es el ángulo de inclinación en la i-ésima línea de muaré; Δy_i es el segmento paralelo al eje y entre las líneas contiguas de muaré $i-1$ e i.

La línea da flechas se obtiene también trazando gráficamente el polígono funicular.

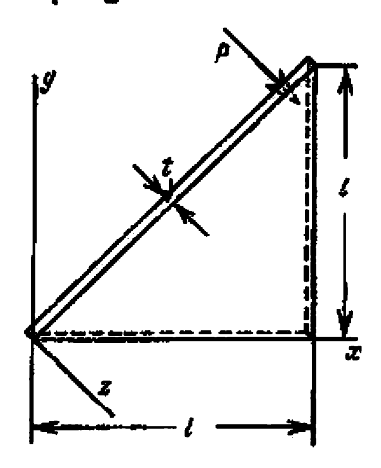


Fig. 100 | Maqueta de una lámina triangular.

Para determinar las tensiones por el cuadro de muaré hace falta hallar primeramente las curvaturas w_{xx}, w_{yy} y w_{xy} mediante la diferenciación numérica o gráfica de las rayas de muaré $w_x = \text{const}$ y $w_y = \text{const}$ o bien directamente por el cuadro de rayas de muaré de curvaturas constantes $w_{xx} = \text{const}$, $w_{yy} = \text{const}$ y $w_{xy} = \text{const}$.

En los puntos cerca de la superficie de la lámina las tensiones se determinan por las siguientes fórmulas:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{Et}{2(1-\mu^2)}(w_{xx} + \mu w_{yy}), \\ \sigma_y &= -\frac{Et}{2(1-\mu^2)}(w_{yy} + \mu w_{xx}), \\ \tau_{xy} &= Gt w_{xy}, \end{aligned}\right\} \tag{85}$$

2. Realización del ensayo. Para el ensayo se toma una lámina de vidrio en cantilever en forma de un triángulo rectángulo isósceles con catetos $l = 275$ mm y de espesor $t = 1{,}6$ mm (fig. 100). La lámina se empotra por el cateto x en un bastidor especial fijado sobre una mesa. De este bastidor cuelgan soportes con

clavijas móviles y reglas de medición para fijar las fuerzas en cualquier punto de la lámina. Dicha lámina ensayada se carga con una fuerza $P = 1$ kgf en el punto $x_P = 262$ mm e $y_P =$ $= 238$ mm.

Sobre el bastidor de otra mesa se fija la pantalla por medio de un cojinete radial que permite hacerla girar alrededor de su eje y fotografiar la lámina reflejando la trama en las posiciones necesarias. Detrás de la pantalla sobre la mesa del mismo basti-

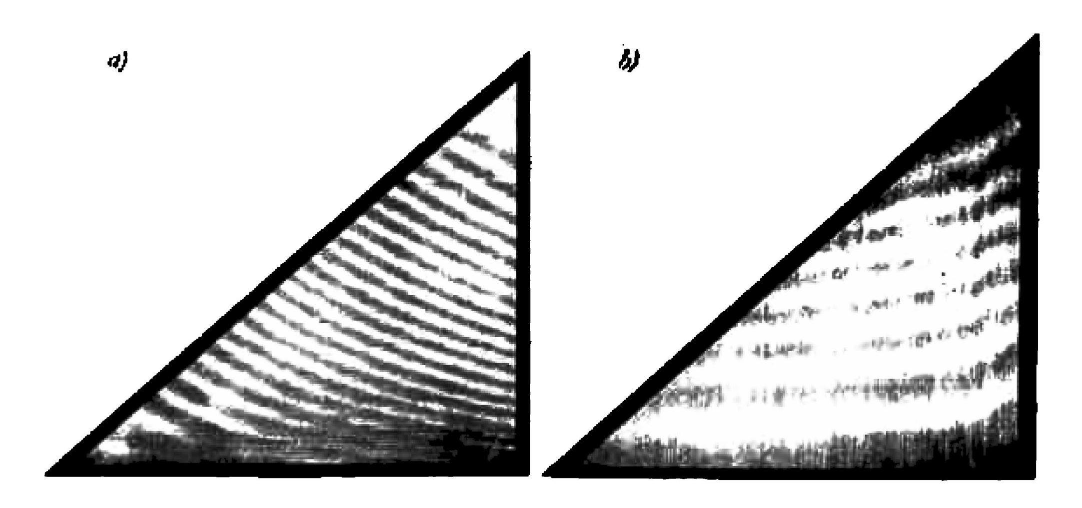


Fig. 101 | Fotos de las rayas de muaré de una lámina triangular: *a*, rayas de muaré $\omega_y = \text{const}$; *b*, rayas de muaré $\omega_x = \text{const}$.

dor se fija una cámara fotográfica. El esquema principal de la instalación puede verse en la fig. 97.

Para obtener las rayas de muaré $w_y = \text{const}$, la pantalla se pone verticalmente de tal manera que las rayas de la trama queden perpendiculares al eje y (horizontales), y se efectúan dos fotografías de su reflexión de la lámina antes y después de cargarla con la fuerza P. En la foto obtenida aparecen rayas de muaré $w_y = \text{const}$ (fig. 101, *a*). Luego se hace girar la pantalla a 90° para que las rayas de la trama queden perpendiculares al eje x (verticales). Se repiten las dos fotografías de la lámina con la reflexión de la trama antes y después de haberla cargado con la misma fuerza P. En la foto nueva se ven claramente las rayas de muaré $w_x = \text{const}$ (fig. 101, *b*).

3. Interpretación de los resultados. En las fotos de los campos de rayas de muaré $w_y = \text{const}$ y $w_x = \text{const}$ deben trazarse cuidadosamente las líneas de muaré estrictamente por sus centros

y determinar el valor de su división. Es igual para ambos sistemas y equivale para nuestra lámina a $\lambda = d/2a = 0{,}00245$ rd. Con el fin de obtener una información más amplia, para realizar el análisis cualitativo se hace coincidir ambos cuadros de líneas de muaré en un plano (fig. 102, *a*). Para nuestra lámina resulta que las tangentes t_β siempre pasan por el segundo y cuarto cuadrante del sistema de los ejes x e y con el origen en la intersección

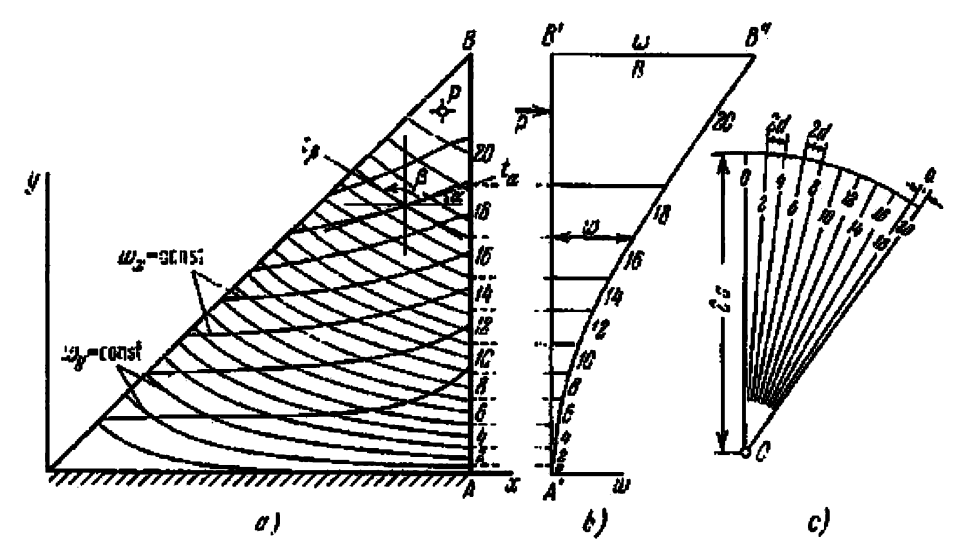


Fig. 102 | Análisis cualitativo y determinación de las flechas por el cuadro de rayas de muaré: *a*, coincidencia de las líneas de muaré $\omega_y = \text{const}$ y $\omega_x = \text{const}$; *b*, curva de flechas por la línea *AB*; *c*, haz de rayos $\omega_y = nd$.

de las líneas de muaré. Los signos de sen β y cos β son diferentes y, por la fórmula (82), hallamos que por toda la superficie de la lámina las curvaturas w_{yy} y $w_{xy} = w_{yx}$ son de un mismo signo. Las tangentes t_α y t_β pasan por distintos cuadrantes, es decir, los productos $\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta$ siempre son negativos; según las fórmulas (81) y (82) $w_{xx} = w_{yy} \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta$, o sea, los signos de las curvaturas w_{xx} y w_{yy} tienen que ser diferentes. Además, para tal posición de las tangentes, la curvatura de Gauss $K < 0$, o bien de la fórmula (83), $\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{ctg}\alpha < 1$. Esto quiere decir que la superficie de la lámina sometida a flexión es anticlástica, o sea, una parte de la superficie se encuentra a un lado del plano tangente a ella en cualquier punto, y otra parte, a otro lado de este plano

Elegimos, para el caso dado, positivo el signo de la curvatura w_{yy} partiendo de la condición de obtener una flecha positiva a causa de la carga P según la dirección del eje z (fig. 100).

4. Flechas de lámina. Apliquemos la construcción gráfica de la curva de flechas, por ejemplo, del lado AB (fig. 102, a) paralelo al eje y. Para esto es necesario hacer uso del cuadro de líneas de muaré $w_y = \text{const}$. Establecemos, por medio de la condición de empotramiento del cateto x y de la revisión del cuadro de rayas de muaré, que la línea $w_y = \text{const}$ es de orden nulo, $n = 0$, e interseca la recta AB en el punto A. Hacia el punto B el orden de cada línea aumenta en uno, es decir, en cada línea el ángulo de inclinación de la superficie de la lámina al eje y crece en este lugar en el valor de una división $\lambda = d/2a$.

En vista de que el número de las líneas de muaré $w_y = \text{const}$ es grande, tendremos en consideración solamente las líneas de órdenes pares. Estas dividen el lado AB en tramos separados, los que dividimos en dos partes iguales y trasladamos los puntos medios sobre la recta $A'B'$ que no es sino la proyección de la lámina sobre el plano zOy (fig. 102, b). Partiendo de esta proyección, al nivel de los puntos medios trazamos unas rectas según la dirección de la flecha w. Al lado construimos, con la escala elegida, un haz de rayos (fig. 102, c). Para esto colocamos sobre el arco de radio $2a$ los tramos $2d$ que son iguales al paso doble de la trama (y corresponden a las líneas pares), y unimos sus extremos con el polo O. El ángulo entre dos rayos contiguos equivale al valor de una división de las líneas pares de muaré igual a 2λ.

Como en el punto A la superficie de la lámina no se encorva por haber sido empotrada, trazamos el rayo nulo del haz verticalmente (por el eje y) y paralelamente a él, partiendo del punto A', el tramo nulo de la curva de flechas hasta la horizontal que va al nivel de la mitad del tramo $A-2$ del borde de la lámina. Así, consecutivamente, continuamos los siguientes tramos de la curva de acuerdo con las reglas de construcción del polígono funicular. Para mayor claridad conservamos igual a numeración del orden de las líneas de muaré, de los tramos correspondientes de la curva y de los rayos del haz. Por ejemplo, a la línea 12 de muaré le corresponde la inclinación del tramo *12* de la curva de flechas trazado paralelamente al rayo *12* del haz desde el final del tramo *10* hasta el inicio del tramo *14*. El último tramo *20* obtiene el incremento del ángulo de inclinación solamente en el valor $d/2a$. La curva construida $A'B''$ determina los valores de las flechas del borde AB de la lámina en la escala elegida.

De modo semejante se construye la línea de flechas según cualquier recta a lo largo del eje y o del eje x.

La flecha de cualquier punto K sobre la recta AB puede determinarse también numéricamente por la fórmula (84). Para este fin es necesario medir todos los segmentos Δy_i de la recta AB dividida por las líneas de muaré $w_y = \text{const}$, y determinar los ángulos de inclinación $w_{i,\,y} = n\lambda$ sobre cada línea de muaré. Una

vez introducidos estos valores en la fórmula (84), obtenemos para nuestro caso

$$w_k = \lambda\,(0{,}5 \cdot \Delta y_1 + 1{,}5 \cdot \Delta y_2 + 2{,}5 \cdot \Delta y_3 + \ \ldots).$$

EXPERIMENTO 30. EXTENSOMETRIA ELECTRICA

1. Extensómetro eléctrico. Hoy día se emplea ampliamente la extensometría por medio de captadores eléctricos de hilo. Sobre todo dichos instrumentos son cómodos para el estudio de deformaciones momentáneas (durante impactos, vibraciones, pérdidas

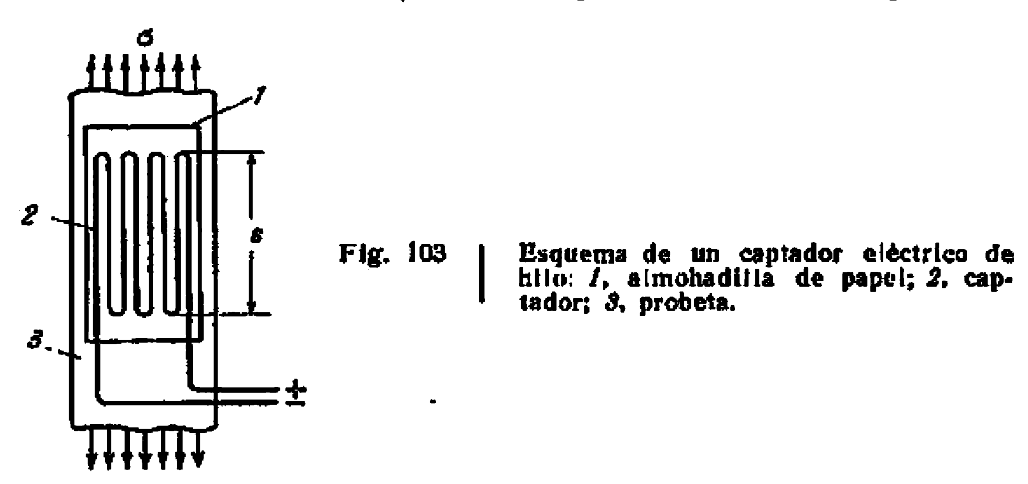


Fig. 103 | Esquema de un captador eléctrico de hilo: *1*, almohadilla de papel; *2*, captador; *3*, probeta.

repentinas de estabilidad, etc.), cuando los extensómetros corrientes, dotados de inercia, son inaceptables.

El funcionamiento del extensómetro eléctrico de hilo se funda en la variación de la resistencia eléctrica del hilo a causa de su tracción o compresión [1]. La parte principal del instrumento es un hilo fino, generalmente de manganina o de constantán [2], de 0,015—0,03 mm de diámetro, colocado en unos cuantos lazos paralelos (fig. 103), que se llama *captador* del extensómetro eléctrico. La longitud s del lazo se llama base del captador. El captador se pega a la superficie de la probeta ensayada, colocando

---

[1] Existen también otros tipos de extensómetros eléctricos: de capacidad, de inducción, piezoeléctricos (véase el § 8), etc.

[2] Constantán es una aleación de cobre (60%) y níquel (40%); manganina es una aleación de cobre (84%), níquel (4%) y manganeso (12%). La resistencia de ambas aleaciones, sobre todo de la última, depende poco de la temperatura. Sin embargo, hay que evitar la presencia de fuertes manantiales de calor por la diferencia existente entre los coeficientes de dilatación del captador y de la pieza ensayada. No se permite durante el experimento que al captador le dé el sol ni calentarlo con una lámpara.

entre la probeta y el hilo una capa aislante de papel de 0,02—0,05 mm de espesor.

Al traccionar o comprimir la probeta, el hilo varía su resistencia, lo que puede medirse por medio del circuito en puente con un galvanómetro sensible.

La deformación del captador y el cambio de su resistencia están enlazados por la dependencia lineal

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma}\frac{\Delta r}{r},$$

donde ε es el alargamiento relativo; r, la resistencia del captador, generalmente igual a 100 ó 200 ohmios; Δr, el incremento de la resistencia del captador que corresponde a la deformación ε; γ, es una magnitud adimensional, llamada sensibilidad del material del captador, más o menos constante para el material dado (para el hilo de constantán $\gamma = 1{,}7 - 2{,}1$). La magnitud γ puede determinarse en el experimento.

Pegando el captador a la probeta, se fija a ella cualquier otro extensómetro. Cargando luego la muestra, se miden el incremento Δr de la resistencia del captador y el alargamiento ε de la probeta en el extensómetro. Como resultado de las mediciones se calcula

$$\gamma = \frac{\Delta r / r}{\varepsilon}.$$

Los captadores del tipo descrito se utilizan para temperaturas de —40 a 70°.

2. Equilibrado del puente. En la fig. 104 aparece el esquema de conexión del captador A al puente de Wheatstone. El captador es un brazo del puente; las veces de otro brazo las hace un captador igual B llamado *de compensación*, pegado a una placa separada hecha del mismo material que la probeta ensayada. La resistencia del captador de compensación tiene que ser igual a la resistencia del captador *activo* A; las condiciones de temperatura tienen que ser iguales para ambos captadores. Los otros dos brazos del puente también son resistencias iguales, por regla general, a la resistencia r del captador. En tal posición, el puente se halla *equilibrado*, y al hacer pasar por él una corriente, la última corre solamente por los brazos del puente; el galvanómetro G, conectado en la diagonal de medición del puente, no registra corriente.

Prácticamente es imposible hacer los brazos del puente de resistencia exactamente igual. Por eso el puente montado se somete, por regla general, al equilibrado de corrección; la placa con el captador de compensación pegado se empotra por un extremo (fig. 105), desplazando el extremo libre del voladizo hacia abajo o hacia arriba por medio de un tornillo 3 (con esto se cambia la resisten-

cia del captador de compensación) hasta lograr el equilibrio total del puente. Dicho tipo de regulador puede variar la resistencia del captador en un 0,5%, es decir, alrededor de 0,5—1,0 Ω.

Cargando la probeta ensayada y, por consiguiente, deformando el captador *A* pegado a ella, vamos a notar la existencia de una corriente en el galvanómetro; el desequilibrio del puente se explica por no ser igual la resistencia del captador activo *A* a la

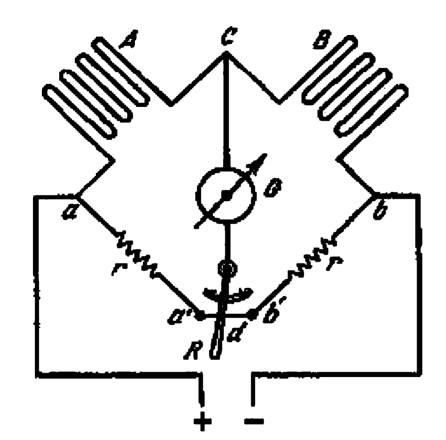


Fig. 104 | Esquema elemental del extensómetro eléctrico: *A*, captador activo (de trabajo); *B*, captador de compensación; *r*, constantes de resistencia; *G*, galvanómetro; *R*, cursor del reóstato; *d*, punto de contacto del cursor con el reóstato.

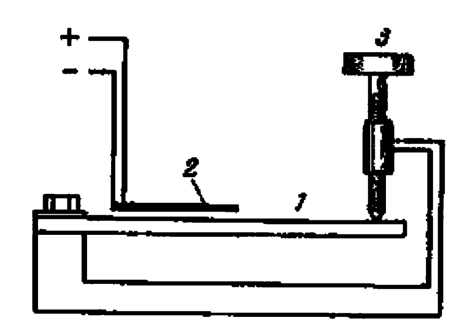


Fig. 105 | Dispositivo para el equilibrado del puente: *1*, voladizo de metal con el captador pegado; *2*, captador *B*; *3*, tornillo para deformar el voladizo.

resistencia invariable del captador de compensación *B*. El cambio de la lectura en el galvanómetro es proporcional a la deformación de la probeta.

Sin embargo, en muchos casos en vez de medir la diferencia de la intensidad de la corriente en el puente, se mide el cambio proporcional de las resistencias de los brazos *ad* y *bd* que se logra por medio de un reóstato *a'b'* para volver a poner el puente en el estado de equilibrio.

El cursor del reóstato *R* tiene una escala de arco. Se puede establecer experimentalmente a qué alargamiento de la probeta le corresponde una división de la escala. Esta magnitud del alargamiento relativo se llama valor de una división del medidor. En el caso del estado tensional lineal el incremento de la tensión se determina por la fórmula siguiente:

$$\sigma = cE\,\Delta n,$$

donde Δn es la diferencia de lecturas en la escala del galvanómetro; c, el valor de una división de la escala del medidor; E, el módulo de elasticidad del material de la pieza ensayada.

El valor de una división del instrumento depende de la sensibilidad del galvanómetro. Utilizando un galvanómetro de espejo se puede obtener $c = 10^{-8}$.

Sin embargo, en la práctica son más cómodos los galvanómetros menos sensibles en combinación con amplificadores de corriente. El medidor con un amplificador electrónico permite medir un alargamiento relativo del orden de 10^{-6}, lo que corresponde a una tensión en el acero de 20 kgf/cm².

3. Realización del experimento. Supongamos, por ejemplo, que el experimento 14 se realiza con extensómetros eléctricos.

Las anotaciones en el registro se efectúan según la forma dada en la tabla 41, designando por c el valor de una división de la escala del medidor.

Una vez concluido el experimento, se debe volver a aplicar la carga inicial y comprobar las lecturas iniciales.

La interpretación de los resultados del ensayo se explica en la descripción del experimento 14.

Tabla 41

№ del captador	Lecturas de los captadores, n		Diferencia de las lecturas Δn	$\beta = Ec$ (para los captadores 1–5) $\beta = \frac{Ec}{1+\mu}$ (para los captadores 6–7)	Incremento de la tensión $\Delta\sigma = \beta\Delta n$	Incremento medio de la tensión (para los captadores 1 y 1'; 5 y 5'; 6 y 7)
	para la carga P_1	para la carga P_2				
1						
1						
2						
3						
4						
5						
5						
6						Media del valor absoluto
7						

Nota: Véase la disposición de los captadores en la fig. 47.

PARTE II

Equipo del laboratorio de ensayo de materiales

CAPÍTULO V

Instrumentos de medición

§ 1. PIE DE REY Y MICROMETROS

Para medir las dimensiones exteriores e interiores de distintas piezas se utilizan pies de rey y micrómetros.

Los pies de rey se fabrican de distintas dimensiones. Para las prácticas de laboratorio se utilizan los pies de rey con los límites de medición desde 0—125 hasta 0—500 mm.

El pie de rey para medir desde 0 hasta 125 mm (fig. 106) consta de una varilla *2* que termina con los picos *1* y *3*, y un cursor *4* con iguales picos, movido libremente a lo largo de la varilla. La varilla *2* posee una escala con divisiones desde 0 hasta 125 cada un milímetro, y el cursor lleva puestas 10 divisiones del nonio *6* que permite tomar lecturas con una precisión de hasta 0,1 mm. Al dorso del pie de rey se sujeta al cursor *4* una regleta *7* que se desliza por una ranura en la varilla y sirve para medir las profundidades. El cursor *4* está dotado de un freno *5*, por medio del cual se asegura su posición fija sobre la varilla, si hace falta convertir el instrumento en un calibre.

La medición de dimensiones exteriores se efectúa entre los picos *1*, desplazando el cursor hasta el contacto de las aristas interiores de los picos con la pieza y ubicando el pie de rey estrictamente en el plano de medición. Las dimensiones interiores se determinan por la posición de las aristas exteriores de los picos *3*, al dar éstos con la superficie interior de la pieza. Para medir la profundidad se debe apoyar la punta de la regleta *7* contra el fondo de la pieza y el tope de la varilla, contra su arista superior.

El número de milímetros enteros de una dimensión a se cuenta en la escala de la varilla partiendo del trazo cero del nonio *6*; el número de décimas de milímetro se determina por el trazo del nonio que coincidirá con algún trazo de la escala.

Los pies de rey con los límites de medición desde 0 hasta 300 mm se fabrican con la posición bilateral de los picos con respecto a la varilla: los picos *1* para la medición y *3*, para el trazado (fig. 107). Estos pies de rey tienen un cursor *7* complementario con su freno y tornillo micrométrico especial para el avance longitudinal del cursor *4* durante la determinación exacta de una dimensión. La escala del nonio *6* se traza sobre una regleta particular sujetada al cursor *4* con tornillos, lo que hace posible el ajuste longitudinal del nonio. Esta escala tiene 50 divisiones y

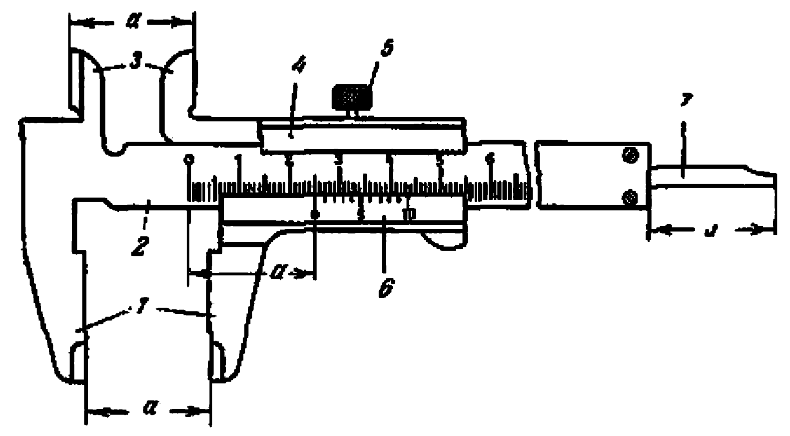


Fig. 106 | Pie de rey de 0 a 125 mm: *1*, picos; *2*, varilla; *3*, picos; *4*, cursor; *5*, freno; *6*, nonio; *7*, regleta.

por eso la precisión de la medición alcanza 0,02 mm. El calibre mínimo posible de medir, igual a la distancia *b* entre las aristas exteriores en la posición de boca cerrada, está marcado sobre uno de los picos. Hay que añadir el valor *b* a la lectura del nonio al medir dimensiones interiores.

Los pies de rey de otras dimensiones, con el límite superior de medición mayor que 300 mm, difieren de los anteriormente descritos por tener la boca unilateral solamente para la medición.

Los micrómetros se destinan para la medición de dimensiones exteriores con una precisión de hasta 0,01 mm.

El palmer (fig. 108) consiste en un bastidor *1*, un extremo del cual tiene sujetado el tope *2* y el otro, el casquillo *5*. Dentro del casquillo se mueve un tornillo micrométrico *3*, accionado por el tambor *6*. El casquillo lleva trazada una raya longitudinal y trazos transversales cada milímetro. Los trazos ubicados abajo de la raya y marcados con cifras cada 5 mm, sirven para contar milímetros enteros. Los trazos puestos arriba de la raya

longitudinal, dividen cada milímetro de la escala inferior en dos partes iguales.

El tambor *6* termina con un cono que tiene grabada una escala circular de 50 divisiones iguales. El paso de la rosca del tornillo micrométrico es de 0,5 mm. Por consiguiente, al dar el tambor *6* una vuelta, el tornillo micrométrico *3* y el tambor obtienen un desplazamiento longitudinal de 0,5 mm con respecto al casquillo, pasando la escala del borde cónico del tambor todas

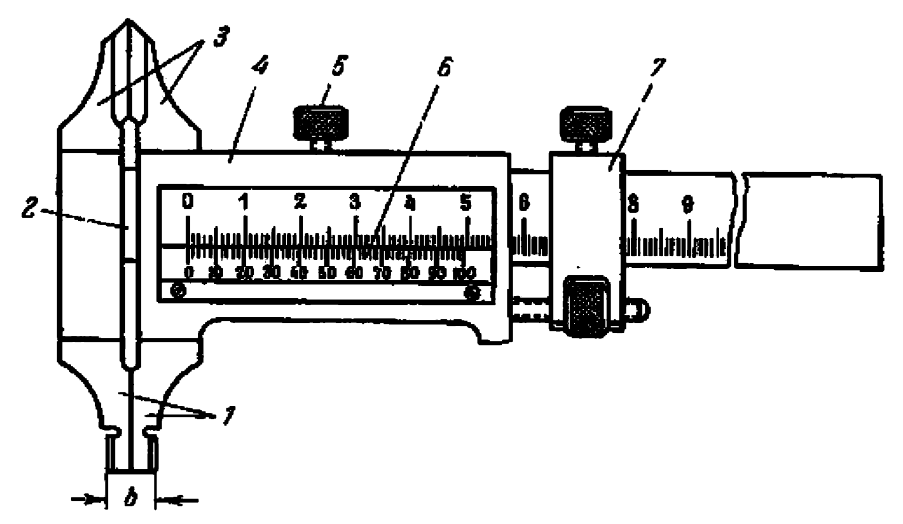


Fig. 107 | Pie de rey de 0 a 200 mm: *1*, picos para la medición: *2*, varilla; *3*, picos para el trazado; *4* cursor; *5* freno; *6*, nonio; *7*, cursor complementario.

las 50 divisiones. De esta manera, el valor de una división de la escala del tambor es 0,01 mm.

Las centésimas de milímetro hasta 0,5 mm se leen directamente en la escala del borde cónico del tambor *6*, si un trazo transversal de abajo del casquillo *5* es el más próximo a este borde. Si cerca del borde del tambor *6* se encuentra un trazo transversal de arriba del casquillo, como puede verse en la fig. 108, entonces al número de centésimas contadas en la escala del tambor se le añadirá 0,5 mm. Por ejemplo, en la fig. 108 el palmer indica que la distancia medida es igual a 5,51 mm.

Al tocar entre sí las superficies de medición del tope y del tornillo de los palmer que tienen el límite inferior de medición igual a cero, el borde cónico del tambor coincide con el trazo cero del casquillo, y el trazo cero de la escala del tambor, con la raya longitudinal del casquillo. Si el límite inferior de medición del palmer difiere de cero, tal coincidencia de los trazos cero corresponde a la distancia entre las superficies de medición del tope y

del tornillo igual a este límite inferior, añadiéndole la lectura leída en las escalas del palmer.

La total traslación de medición del tornillo micrométrico de todos los palmer con el límite superior de medición de hasta 300 mm inclusive es de 25 mm. Los palmer con un límite superior de medición mayor que 300 mm tienen la traslación de medición del tornillo de 100 y 200 mm.

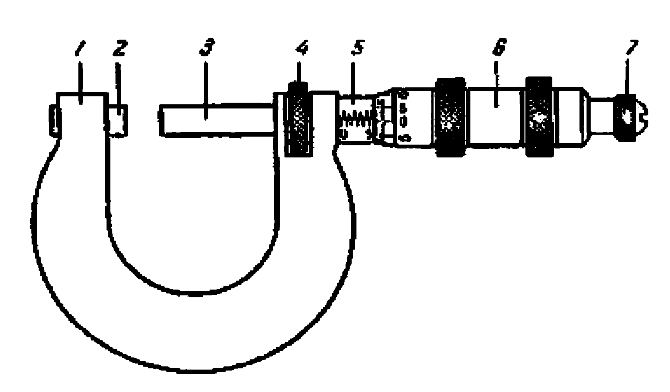


Fig. 108 | Palmer: *1*, bastidor; *2*, tope; *3*, tornillo micrométrico; *4*, tornillo de retención; *5*, casquillo; *6*, tambor; *7*, botón de trinquete.

El tambor *6* está dotado en el extremo libre de un botón *7* de trinquete. Al hacer girar el botón *7*, el tambor gira hasta que la pieza se quede apretada entre las superficies de medición del tornillo y del tope por una presión determinada, después de lo cual el botón *7* ya gira junto con el trinquete. Con esto se asegura una fuerza de medición constante del tornillo micrométrico y se suprime la influencia de las deformaciones de la pieza sobre la exactitud de las mediciones.

El tornillo de retención *4* sirve para fijar inmóvilmente el tornillo micrométrico cuando la abertura está determinada.

Existen micrómetros especiales con esfera, destinados principalmente para medir los espesores de chapas y bandas. Tales micrómetros se fabrican teniendo los siguientes límites de medición: 0—5, 0—10 y 0—25 mm. Se distinguen por tener una aguja móvil, comunicada con el tambor, y una esfera fija sujetada sobre el bastidor junto con el casquillo. La esfera hace las veces de la escala del tambor; la aguja, girando junto con el tambor, indica en la esfera las centésimas de milímetro. El diámetro de la esfera es mucho más grande que el diámetro del tambor, y por eso las divisiones de centésimas son más grandes en la esfera que en la escala del tambor, lo que permite determinar a simple vista también las milésimas de milímetro.

§ 2. INDICADOR PARA MEDIR DESPLAZAMIENTOS LINEALES [1]

La estructura del indicador para mediciones lineales se da esquemáticamente en la fig. 109 y su funcionamiento es como sigue: el perno de medición *1* se apoya a fuerza de un resorte contra la superficie *2* cuyo desplazamiento en la dirección del perno de medición se debe medir. La caja redonda *3* del indicador con un sistema de engranajes y una esfera fijados dentro de ella es sostenida inmóvilmente por un soporte especial. Los desplazamientos de la superficie de apoyo *2* provocan el desplazamiento del perno de medición *1* que hace girar la aguja *4* por medio de engranajes.

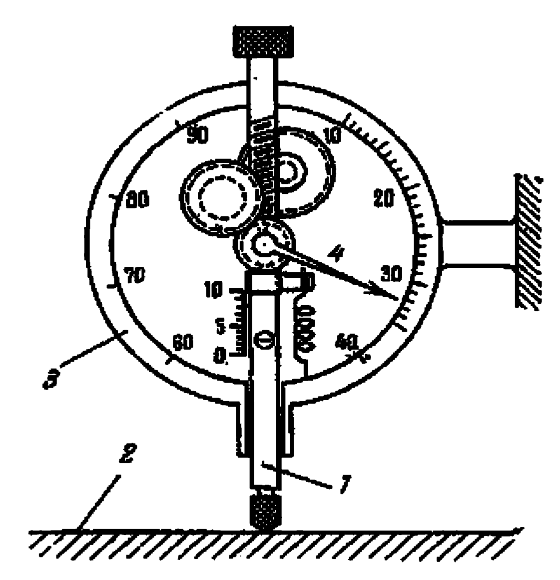


Fig. 109 | Esquema de un indicador para mediciones lineales: *1*, perno de medición (apoyado contra la viga *2* a fuerza de un resorte); si la viga se desplaza, el perno de medición hace girar la aguja *4* del reloj.

Una división de la esfera corresponde a 0,01 mm del desplazamiento del perno de medición, y una vuelta completa de la aguja, a 1 mm del desplazamiento de éste. Los desplazamientos del perno de medición se leen en milímetros directamente en la escala lineal desde 0 hasta 10 mm.

Los indicadores son ampliamente utilizados para las mediciones lineales. Existen indicadores del tipo descrito que tienen una precisión de 0,001 mm.

---

[1] Otro nombre es reloj medidor.

No pocas veces el indicador es parte integrante de un unstrumento más complicado, por ejemplo, de un dinamómetro.

§ 3. MEDIDORES DE ANGULOS DE TORSION (TORSIOMETROS)

1. Torsiómetro de espejo. Examinemos la estructura del torsiómetro de espejo (fig. 110).

Sobre un árbol se instalan dos mordazas que abrazan fuertemente este último, y en cada mordaza se fija un espejo *1*, obser-

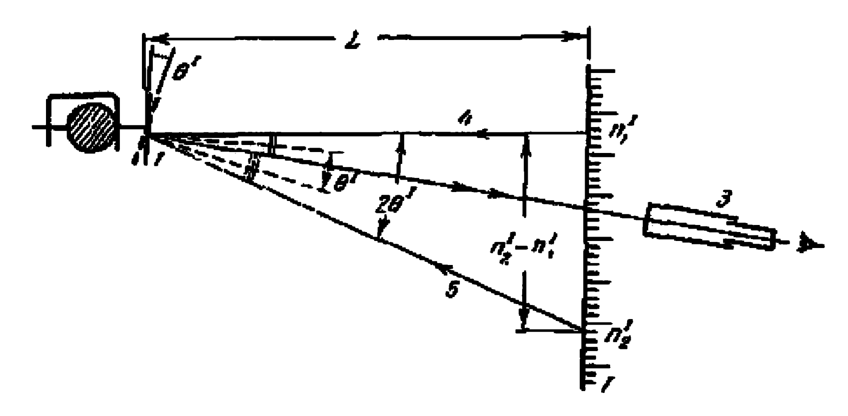


Fig. 110 | Esquema de un torsiómetro de espejo: *1*, espejo; *2*, mordaza que porta el espejo; *3*, anteojo; *4* y *5*, rayos que van de la regla al anteojo para diversas posiciones del espejo.

vado mediante un anteojo *3*. Cerca del anteojo se coloca verticalmente una regla, vuelta con la escala hacia el espejo. Este se pone de tal manera que se pueda ver en el anteojo la reflexión de la regla, en la cual se toma la lectura. Supongamos que la lectura antes de haber cargado la probeta es igual a n_1^I. Una vez cargada la probeta y girada la mordaza a un ángulo θ^I, se toma la lectura n_2^I. El ángulo entre dos rayos correspondientes *4* y *5* (como puede verse en el dibujo) es $2\theta^I$. Como el ángulo θ^I es insignificante, podemos considerar que $2\theta^I = (n_2^I - n_1^I)\frac{1}{L}$, siendo L la distancia entre el espejo y la regla. De ahí $\theta^I = (n_2^I - n_1^I)\frac{1}{2L}$.

De igual manera se determina el ángulo de giro $\theta^{II} = (n_2^{II} - n_1^{II})\frac{1}{2L}$ de otra mordaza. La diferencia $\theta^{II} - \theta^I$ equivale al ángulo $\Delta\theta$ de torsión de la probeta en la longitud l entre dos

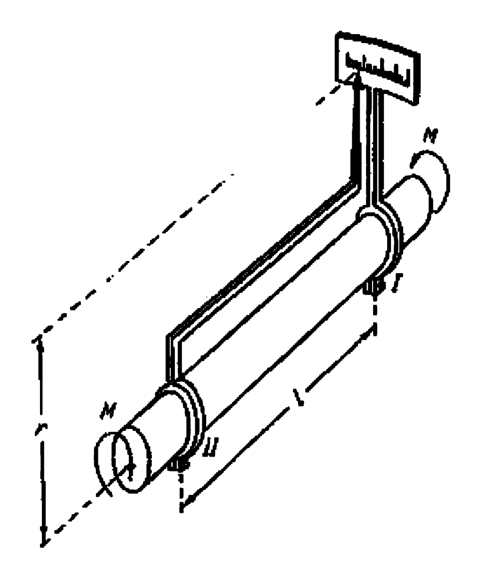


Fig. 111 | Esquema de medición del ángulo de giro de la sección *II* del árbol con respecto a la sección *I* por medio de un torsiómetro con escala móvil.

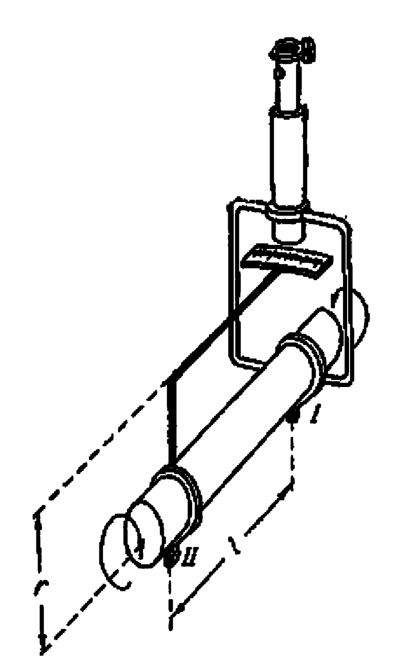


Fig. 112 | Torsiómetro con escala móvil y microscopio.

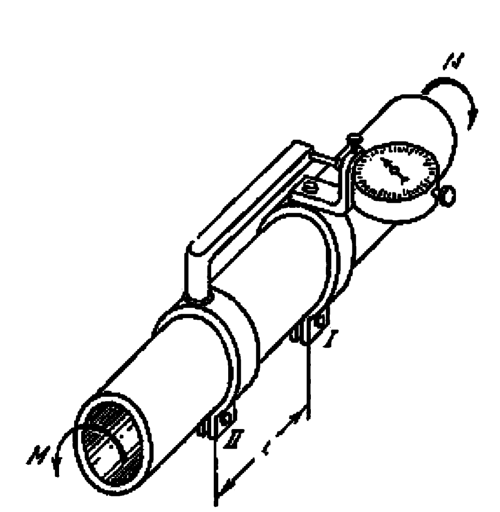


Fig 113 | Torsiómetro con indicador.

mordazas

$$\Delta\theta = [(n_2^{II} - n_1^{II}) - (n_2^{I} - n_1^{I})]\frac{1}{2L} = \frac{\Delta n}{2L}. \qquad (86)$$

donde $\Delta n = (n_2^{II} - n_1^{II}) - (n_2^{I} - n_1^{I})$ es incremento de la diferencia de lecturas en las reglas.

2. Torsiómetro con escala móvil. En el caso de un empotramiento flexible como, por ejemplo, en la máquina descrita en el § 16, toda la probeta gira en el proceso del ensayo a un ángulo apreciable. En este caso hay que utilizar torsiómetro con escala móvil.

Supongamos que es necesario determinar el ángulo de giro de la sección *II* de un árbol (fig. 111) con respecto a la sección *I*. En estas secciones se ponen anillos de fijación. A uno de ellos se sujeta una escala lineal (o angular) en el plano perpendicular al eje de la probeta. Al otro se le sujeta una aguja, cuyo extremo alcanza la susodicha escala. Al girar la probeta, la punta de la aguja marcará en la escala el cambio de la lectura. Dividiendo el incremento de la lectura entre la longitud r de la aguja (contando a partir del eje del árbol), obtenemos el ángulo buscado de torsión del árbol entre las secciones *I* y *II*.

Si las deformaciones son pequeñas, las veces del dispositivo de visor puede hacerlas un microscopio (véase la fig. 112). Este se sujeta al anillo *I*, y la escala, al anillo *II*; dicha escala, torciéndose la probeta, se desplaza ante el objetivo del microscopio.

A menudo en vez del microscopio puede hacerse uso del indicador, como aparece en la fig. 113. El indicador mide el desplazamiento lineal con una precisión de hasta 0,01 mm. El resorte del indicador puede deformar un poco el dedo, contra el cual se apoya el perno de medición. Por eso no se permiten movimientos de reversión al tomar lecturas.

§ 4. INCLINOMETROS

1. **Inclinómetro de espejo.** Se llama inclinómetro un dispositivo o instrumento destinado para medir el ángulo de giro de la sección de la viga sometida a flexión. Este ángulo puede considerarse igual al ángulo de inclinación del eje de la viga (de ahí viene el nombre del instrumento).

Existen inclinómetros de varios sistemas.

Los inclinómetros de espejo tienen una estructura igual a la de los goniómetros de espejo, empleados para medir los ángulos de torsión (véase el § 3). Un espejo *I* (fig. 110) se fija inmóvilmente en aquella sección de la viga donde ha de medirse el ángulo de giro θ. Antes de haber cargado la viga, en el espejo se

lee mediante el tubo óptico una lectura n_1 sobre la escala. Una vez cargada la viga y girada la sección y, por consiguiente, el espejo a un ángulo θ, la lectura en la escala varía; designemos la lectura nueva por n_2. La diferencia de las lecturas $\Delta n = n_2 - n_1$, dividida por la distancia L entre el espejo y la escala, ofrece el ángulo 2θ, es decir,

$$\theta = \frac{\Delta n}{2L}.$$

2. Inclinómetro de nivel. La estructura del inclinómetro de nivel se da esquemáticamente en la fig. 114. Un nivel cilíndrico

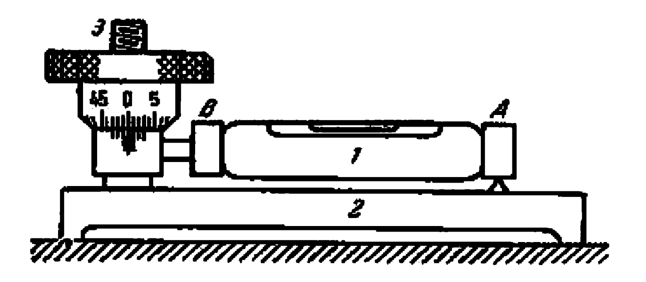


Fig. 114 | Inclinómetro de nivel: *1*, nivel cilíndrico; *2*, soporte que descansa sobre la viga ensayada; *3*, tornillo micrométrico elevador del nivel con divisiones en la cabeza.

montado *1* se arma sobre un soporte metálico macizo *2*. El extremo *A* del nivel está apoyado inmóvilmente sobre este soporte. El extremo *B* puede levantarse o bajarse por medio de un tornillo micrométrico *3*. El giro de la tuerca del tornillo se fija en

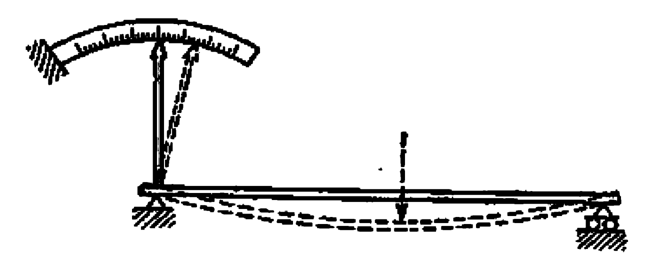


Fig. 115 | Inclinómetro de aguja.

una escala puesta sobre la tuerca. Una división del movimiento de la tuerca corresponde a un cambio del ángulo de inclinación del eje del nivel de 0,0001 rd. El inclinómetro se instala fijamente sobre el ala de la viga, estando el eje del instrumento paralelo

al eje de la viga. Al cargar la viga, la burbuja del nivel se pone, por medio del tornillo *3*, en la posición intermedia, tomando la lectura en la escala de la tuerca del tornillo. Estando aplicada una carga nueva, se vuelve a poner la burbuja en la posición intermedia y a tomar la lectura en la escala, etc. Se puede reducir la base del inclinómetro (la longitud del soporte), haciendo uso de un soporte complementario de menor tamaño.

3. Inclinómetro de aguja. En el caso de una viga flexible es cómodo un dispositivo simple que puede verse en la fig. 115. Una aguja se une rígidamente a la viga. Al cargar la viga, la aguja gira junto con la viga e indica sobre una escala de arco fija el ángulo de giro de la sección dada de la viga.

Dicho método sirve para medir ángulos de giro de las secciones de la viga que se encuentran sobre los apoyos, lo que, por regla general, se necesita.

§ 5 MAQUINA DE DIVISION

En muchos casos las condiciones del ensayo exigen la previa división de las probetas en tramos iguales, y a veces hasta el trazado de una red de divisiones. La división de las probetas en tramos iguales se efectúa en una máquina especial de división (fig. 116).

La máquina de división consta de una bancada hueca no grande *3*, un carro móvil *5* que se desliza por la bancada en sus guías en forma de ranuras longitudinales de sección de "cola de milano", un mecanismo para mover el carro en la dirección longitudinal, y un mecanismo para mover en la dirección transversal una cuchilla *4* que traza las divisiones sobre la probeta. En la parte inferior del carro hay una cremallera *13* que engrana con la uñeta *9* del mecanismo de traslado del carro. El paso de los dientes de la cremallera es de 5 mm.

Una probeta redonda o plana se pone sobre el carro entre las puntas desmontables que la fijan en la dirección estrictamente longitudinal, y por medio de los tornillos de apriete *7* la sujetan inmóvilmente al carro. Este se desplaza, con la probeta sujetada encima, a la derecha, levantando previamente hacia arriba la parte de la uñeta *9* que sobresale de la bancada, librándola de este modo del engranaje con la cremallera del carro. Colocando el carro *5* de manera que el inicio de las divisiones de la probeta se encuentre bajo la cuchilla *4*, se aplica la uñeta *9* y el carro se desplaza hasta que alguno de los dientes de la cremallera dé con él. Después el punto elegido para trazar la división inicial se coloca exactamente bajo la cuchilla, lo que se efectúa por medio del tornillo de regulación *6*, cuyo giro le comunica al carro

un pequeño movimiento de avance independiente de la cremallera *13*.

El mecanismo de traslación del carro consta de una manivela *1*, dos excéntricas puestas sobre el eje de la manivela dentro de la bancada, y una biela perfilada con la uñeta *9*. Dicha biela se pone con un extremo sobre el eje inmóvil *2*, con el otro se une mediante una articulación con la uñeta *9*, y con el tercero se apoya contra una de las excéntricas dentro de la bancada. Al hacer girar

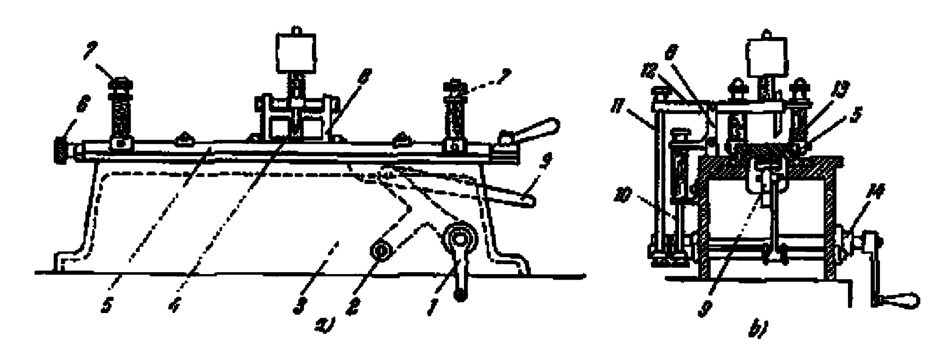


Fig. 116 | Máquina de división: a, elevación; *b*, corte; *1*, manivela; *2*, eje inmóvil; *3*, bancada; *4*, cuchilla; *5*, carro; *6*, tornillo de regulación; *7*, tornillos de apriete; *8*, bastidor; *9*, uñeta; *10* y *11*, tirantes; *12*, balancín; *13*, cremallera; *14*, acoplamiento.

la manivela *1*, la excéntrica empuja la biela y la uñeta hace correr el carro a la izquierda en uno o dos dientes, según la excéntrica contra la cual se apoya la biela. Si ésta se apoya contra la excéntrica delantera, el carro se desplaza a la izquierda en un diente, si se apoya contra la trasera, en dos dientes. Bajo la manivela, sobre su eje, hay un acoplamiento *14* para cambiar las excéntricas. La biela siempre se mantiene apretada contra la excéntrica mediante un resorte, y después del traslado del carro a la izquierda, vuelve a la posición inicial, llevando consigo la uñeta *9* que engrana con el diente siguiente de la cremallera.

En consecuencia, a cada vuelta de la manivela *1* la probeta se desplaza en la dirección longitudinal en un paso igual a 5 ó 10 mm, según se necesita.

Sobre el eje de la manivela *1*, en el exterior de la parte de atrás de la bancada, son puestas además dos excéntricas que forman parte del mecanismo de traslación de la cuchilla *4*. La primera de ellas, contigua a la pared de atrás de la bancada, está destinada, durante el trazado de las divisiones, para la traslación

de la cuchilla perpendicularmente a la probeta, y la segunda, para el levantamiento de la cuchilla durante su retroceso.

Al hacer girar la manivela *1*, la primera excéntrica exterior aprieta la palanca puesta sobre el eje inmóvil *2* fuera de la bancada, y mediante el tirante *10* tira hacia abajo la cola de un bastidor vertical *8*. Este tiene el eje de rotación inmóvil sujetado a las columnas en la superficie exterior de la bancada. Desviándose de la posición vertical a causa de la bajada de su cola, el bastidor arrastra el balancín *12* con la cuchilla *4*, ubicada en el eje superior del bastidor. Esta cuchilla bajo un peso que lleva el balancín, hace un trazo transversal sobre la probeta. El tirante *10* tiene rosca en el extremo superior y una tuerca para regular el recorrido de la cuchilla, y un resorte helicoidal que retorna el bastidor *8* con la cuchilla *4* a la posición inicial.

La otra excéntrica exterior, dando vueltas junto con el eje de la manivela *1*, aprieta el extremo de la segunda palanca puesta sobre el eje inmóvil *2* en el plano de la excéntrica. Con otro extremo esta palanca se une con el tirante *11* colgado del brazo trasero del balancín *12*. Así, pues, la segunda excéntrica, apretando su palanca, provoca el levantamiento de la cuchilla.

El inicio del levantamiento de la cuchilla coincide con el inicio de su retorno a la posición original y de la traslación longitudinal del carro *5* en un paso a la izquierda. Cuando cesan estos movimientos y la cuchilla bajo el peso da de nuevo con la probeta, empieza a accionar la primera excéntrica exterior provocando el desvío del bastidor *8* y la traslación de la cuchilla por la probeta. Simultáneamente, la biela perfilada dentro de la bancada accionada por el resorte, empieza el movimiento a la derecha, y la uñeta *9* engrana de nuevo con la cremallera *13* cada uno o dos dientes. La secuencia de los movimientos de la cuchilla y del carro se conserva siempre invariable y puede ajustarse con facilidad, porque todas las cuatro excéntricas que provocan el movimiento, se encuentran en un mismo eje.

A veces los trazos dejados por la cuchilla son tan profundos, que la destrucción de la probeta sucede en su plano. Para evitar la influencia de los trazos sobre la destrucción de la probeta, su superficie previamente se ennegrece, tratándola con una solución fuerte de caparrosa azul. El peso que ejerce presión sobre la cuchilla se quita del balancín, y la cuchilla se vuelve con su parte de atrás según la dirección del movimiento para que no raye la probeta con su filo. Entonces sobre la superficie ennegrecida de ésta aparecen trazos que no cambian en absoluto la resistencia de la probeta, pero son lo suficientemente claros y delgados.

§ 6. EXTENSOMETROS DE PALANCA

1. Extensómetro de Aistov. La estructura del extensómetro de Aistov se muestra en la fig. 117. Es un instrumento del sistema de palanca igual que el extensómetro de Guggenberger descrito en el experimento 5. Pero en vez de la aguja tiene un tornillo micrométrico con el limbo *1*, en el cual se toma lecturas.

La plancha *2* se aprieta contra la superficie *3* de la probeta ensayada mediante una mordaza que no está mostrada en la figura. La plancha tiene un apoyo fijo *4* y otro móvil *5*. El apyo *4*

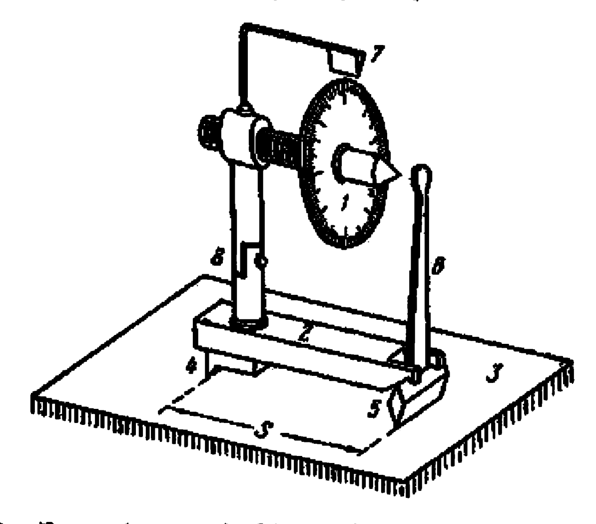


Fig. 117 | Extensómetro de Aistov: *1*, limbo del tornillo; *2*, plancha; *3*, probeta ensayada que se deforma; *4*, apoyo fijo; *5*, apoyo móvil en forma de un prisma; *6*, palanca; *7*, indicador de lectura sobre el limbo; *8*, columna que tiene una junta aislante.

se pone de antemano a una distancia determinada *s* del apoyo *5*. La distancia *s* es la base del extensómetro; el valor máximo de la base sin alargador es de 60 mm. El apoyo *4*, hecho en forma de un prisma, girará en el caso de la deformación de la superficie de la probeta ensayada. Junto con el prisma gira la pequeña palanca *6*, sujetada a él. La relación de la altura del prisma a la longitud de la palanca es 1 : 5. Es decir, la traslación del extremo superior de la palanca es igual al alargamiento medido, aumentado cinco veces. Este desplazamiento se determina mediante el tornillo micrométrico de acuerdo con la diferencia de las lecturas en el limbo *1* antes y después de la deformación.

Las lecturas en el limbo se toman a partir del indicador fijo *7*. Para tomar la lectura es necesario, haciendo girar a mano el limbo, llevar la punta afilada del tornillo hasta el contacto con la

palanca 6. El momento del contacto se determina por el cortocircuito que enciende una bombilla (en la fig. 117 el tendido eléctrico no se muestra). Una corriente de 4 ó 6 V de tensión se aplica al tornillo micrométrico y se conduce por la palanca 6; la columna 8 que soporta el tornillo tiene una junta aislante.

Una vez que se ha tomado la lectura, hay que retirar el tornillo para asegurarle la posibilidad de desplazamiento libre durante el alargamiento de la probeta. No hace falta hacerlo, si la probeta no se ensaya a tracción, sino a compresión.

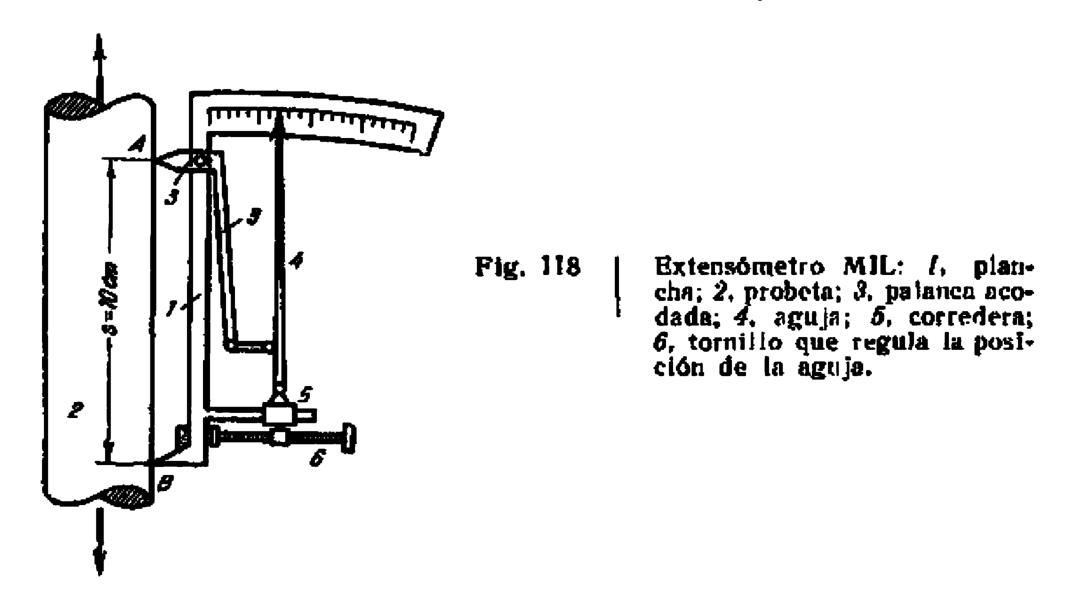


Fig. 118. Extensómetro MIL: *1*, plancha; *2*, probeta; *3*, palanca acodada; *4*, aguja; *5*, corredera; *6*, tornillo que regula la posición de la aguja.

El paso del tornillo micrométrico es igual a 0,5 mm; el limbo tiene 100 divisiones. Es decir, el giro del limbo en una división equivale a 0,005 mm de desplazamiento del tornillo a lo largo de su eje. Esto corresponde, como ya se dijo anteriormente, a un alargamiento de la probeta en 0,001 mm. En fin, el valor de una división de la escala del extensómetro de Aistov es igual a 0,001 mm.

2. Extensómetro MIL[1]**.** El extensómetro MIL sirve para medir alargamientos de la probeta durante carga estática. Difiere del extensómetro de espejo descrito en el experimento 2 por no necesitar tubos ópticos. La escala se encuentra directamente sobre el instrumento.

El esquema del instrumento aparece en la fig. 118. La plancha *1* se aprieta contra la probeta *2* mediante una mordaza de resorte que no se muestra en la figura. El extremo *B* de la plancha tiene

[1] Abreviatura de los apellidos Y. N. Morozov y A. R. Ilín constructores del extensómetro

un apoyo fijo en forma de un diente, y el extremo *A* se une por medio de una articulación con una palanca acodada *3*. La punta del brazo corto de ésta se apoya contra la probeta y sirve de apoyo móvil para la plancha móvil *1*. La longitud *s*, igual a la distancia entre los puntos de apoyo de la plancha, se llama base del extensómetro; generalmente es igual a 10 cm. Cuando se carga la probeta y, por consiguiente, varía *s*, la palanca acodada *3* gira alrededor de la articulación. El brazo largo de la palanca se une con la aguja *4*, provocando, al girar, su desplazamiento.

Se toma lecturas por la punta superior de la aguja en una escala uniforme de arco. El aumento del instrumento es alrededor de 500—600. El valor de una división de la escala se establece por medio de calibración y se anota en el certificado técnico.

El extremo inferior de la aguja se acopla articuladamente con la corredera *5*, cuya posición puede haber sido cambiada mediante el tornillo *6*. De esto se aprovecha para poner la aguja en la lectura determinada de la escala. En la fig. 118 puede verse la mitad del instrumento, que consta de dos extensómetros instalados simétricamente por ambos lados de la probeta y unidos por un resorte.

La existencia de dos extensómetros permite excluir la influencia de la excentricidad inevitable de carga; el alargamiento de la probeta se halla como el promedio de las indicaciones de ambos extensómetros.

§ 7. PLANIMETROS

El planímetro es un instrumento propio para la medición mecánica de áreas, siguiendo el contorno en el plano dibujado en alguna escala. Existen varios sistemas de los planímetros. Pero el más amplio uso han encontrado los planímetros polares (circulares).

Los elementos principales de un planímetro polar (fig. 119) son un contador y dos brazos: uno de polo *2* y el otro para seguir el contorno *8*.

El brazo para seguir el contorno representa una varilla cuadrada *8*, cuyo extremo está provisto de una aguja vertical *9* con resorte; ésta tiene sobre su eje un mango articulado. Sujetando el mango con los dedos, se sigue con la aguja el contorno del área medida. La patica *10*, atornillada al mango por abajo, sirve de apoyo para el brazo en este extremo y, al seguir el contorno, se desliza por el papel. La altura de la patica se regula mediante su tornillo de modo que la aguja no raye el papel.

En el otro extremo el brazo *8* tiene puesto con sus orificios cuadrados el marco *4* del mecanismo de conteo. Sobre el eje móvil ubicado dentro del marco paralelamente al brazo de seguir el con-

torno, se encuentra una ruedecilla de conteo *5* con una escala por el perímetro; sirve de otro apoyo del brazo. Al otro lado de la varilla *8* el marco *4* tiene una ruedecilla más, que sirve de tercer apoyo para la palanca de seguir el contorno y le da a ella y a todo el mecanismo estabilidad en el plano horizontal.

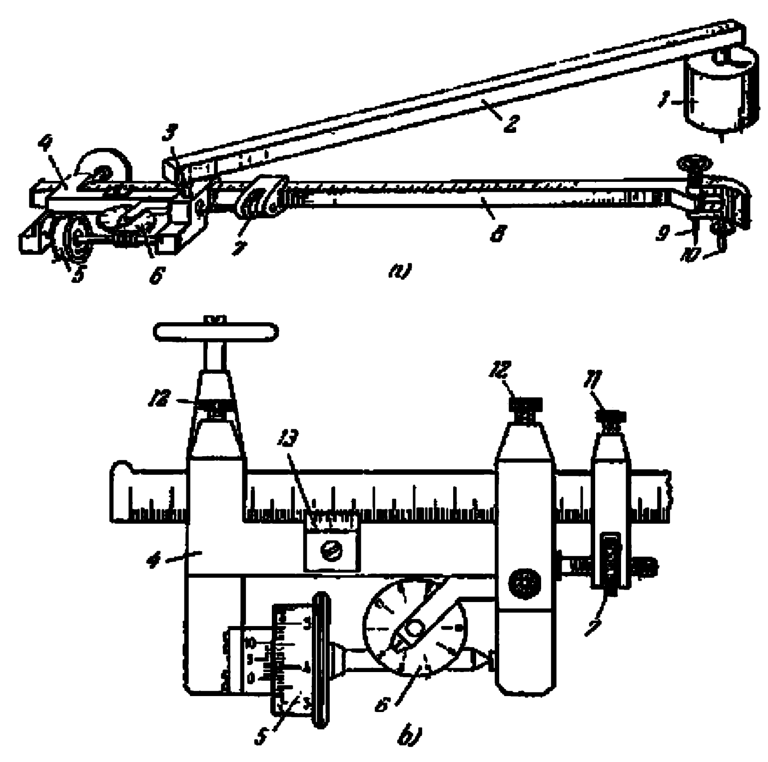


Fig. 119. Planímetro polar: *a*, aspecto general; *b*, mecanismo de conteo: *1*, peso; *2*, brazo de polo; *3*, saliente; *4*, marco; *5*, ruedecilla de conteo; *6*, esfera; *7*, tornillo micrométrico; *8*, brazo para seguir el contorno; *9*, aguja; *10*, patica; *11*, seguro; *12*, tornillos de sujeción; *13*, nonio.

El brazo de polo *2* tiene en un extremo un saliente *3* con punta esférica. Mediante este saliente se efectúa la articulación del brazo de polo *2* con el de seguir el contorno *8*. Con este fin el saliente se introduce en un hueco especial de fondo semiesférico, hecho en el marco *4* entre la aguja *9* y la ruedecilla de conteo *5* sobre una recta que pasa por la aguja paralelamente a la varilla *8*. El brazo de seguir el contorno está provisto en su otro extremo de un peso *1* que tiene una punta en medio de la superficie inferior. Para trabajar con el planímetro, la punta del peso *1* se fija en el

papel en donde está dibujada el área que se ha de medir. La punta del peso es el polo inmóvil del planímetro. Así, pues, el brazo de polo *2* puede moverse solamente alrededor del polo inmóvil, describiendo el saliente *3* una circunferencia. El brazo de contorno *8* puede correr junto con el saliente *3* y a la vez girar alrededor de su eje vertical.

Al seguir la aguja *9* el contorno de la figura, en el caso del movimiento del brazo *8* a lo largo de su eje, la ruedecilla de conteo se desliza por el papel y la lectura en su escala seguirá siendo invariable. Si el brazo se mueve perpendicularmente a su eje junto con el saliente *3* o gira alrededor del eje del mismo cuando éste se queda inmóvil, la ruedecilla *5*, a causa del rozamiento, va a rodar sobre el papel, cambiando la lectura en su escala. Al realizar el brazo de seguir el contorno *8* un movimiento complejo, la ruedecilla rodará, deslizándose a la vez.

Junto con la ruedecilla gira su eje que por medio de un tornillo sin fin hace girar la esfera *6* que tiene diez divisiones. Cada división de esta esfera vale una vuelta de la ruedecilla. El borde de la ruedecilla es dividido en décimas y centésimas, y por el nonio, fijado sobre el marco al lado de la ruedecilla, pueden tomarse milésimas. De esta manera, la lectura, expresada en milésimas de la circunferencia del borde de la ruedecilla, se compone de las cuatro cifras siguientes: la primera —el número de miles— se determina según las indicaciones de la aguja de la escala *6*; la segunda y la tercera —el número de centenas y decenas—, en la escala de la ruedecilla *5*; la cuarta —el número de unidades de milésimas—, en el nonio. Por ejemplo, lo que marcan las escalas en la fig. 119, *b* corresponde al número 2373. Las cifras sobre las escalas ya de la ruedecilla *7*, ya de la esfera *6* son puestas de tal manera que, al seguir el contorno con la aguja *9* en el sentido de las manecillas del reloj, las indicaciones de todas las escalas aumentan, y disminuyen, en el caso de seguir la aguja en contra del giro de las manecillas del reloj.

La longitud del brazo de seguir el contorno puede variarse demasiado ampliamente según la extención del área medida. Con este fin la arista superior de la varilla *8* tiene grabada una escala, y en el marco *4* están previstos el nonio *13* y el tornillo micrométrico *7*, que sirven para una instalación exacta de la longitud del brazo. Para esto se aflojan primeramente todos los tornillos de retención, y la varilla *8* se pone aproximadamente en la longitud deseada. Luego ésta se aprieta con el seguro *11* y se pone por medio de tornillo micrométrico exactamente la longitud necesaria en el nonio *13*, después de lo cual la varilla definitivamente se fija con los tornillos *12*.

Es aconsejable poner el planímetro sobre el plano de manera que el polo se encuentre fuera del contorno de la figura medida.

Solamente en los casos excepcionales se debe ubicar (fijar con aguja) el polo del planímetro dentro del contorno de la figura. Al elegir el polo se necesita hacer una prueba para cerciorarse de que no hace falta trasladar el polo o cambiar la longitud del brazo de seguir el contorno.

Una vez que se ha elegido el polo, se pone la aguja en un punto arbitrario, pero visible, del contorno que se considera el punto inicial, y se toma en las escalas del mecanismo de conteo la primera lectura n_1. Luego se sigue con la aguja todo el contorno tratando de repetir, en la medida de lo posible, exactamente todos sus recodos; llegando al punto inicial, se toma la segunda lectura n_2. En el caso de seguir el contorno en el sentido de las manecillas del reloj, la segunda lectura será mayor que la primera.

El área medida F se calcula a partir de una de las siguientes fórmulas según la posición del polo fuera o dentro del contorno:

para el polo fuera del contorno $F = C(n_2 - n_1)$; (87)

para el polo dentro del contorno $F = C(n_2 - n_1 + q)$, (88)

siendo C y q los números constantes del planímetro. Generalmente, al planímetro se le adjunta una tabla donde se dan valores de los números constantes para distintas longitudes del brazo de seguir el contorno y para diferentes escalas que tienen mayor uso.

Por si se hace falta, los números constantes del planímetro se determinan con facilidad: para hallar la constante C, se sigue con el planímetro un contorno, cuya área efectiva F_0 es conocida (por ejemplo, un cuadrado del papel milimetrado), con el polo obligatoriamente fuera del contorno, y se toman las lecturas n_1 y n_2. El área F, en escala $1:m$; descrita por este contorno es

$$F = mF_0 = C(n_2 - n_1).$$

De ahí deducimos

$$C = \frac{mF_0}{n_2 - n_1}.$$

Variando las magnitudes de m, se calculan los valores correspondientes C para distintas escalas.

Para hallar la constante q, el contorno se sigue dos veces: una vez se toman las lecturas n_1 y n_2 con el polo fuera del contorno, y la otra son las lecturas n_1' y n_2' tomadas con el polo dentro del contorno. Como en ambos casos el área es la misma, entonces

$$C(n_2 - n_1) = C(n_2' - n_1' + q)$$

o bien

$$q = (n_2 - n_1) - (n_2' - n_1').$$

Para elevar la precisión de la medición es necesario seguir el contorno unas cuantas veces con distintas posiciones del planímetro y de su polo y sacar promedios de las lecturas n_1 y n_2 de todas las mediciones. Para compensar errores posibles a causa de desviación del plano de la ruedecilla de conteo de la perpendicular al brazo de seguir el contorno, se debe, al volver a repetir el contorno, poner la ruedecilla ora a la derecha, ora a la izquierda de los brazos.

§ 8. VIBRADORES

1. Fonocaptor electromagnético. Al investigar las vibraciones de una banda [1]) se utiliza en calidad de vibrador, o sea, excitador

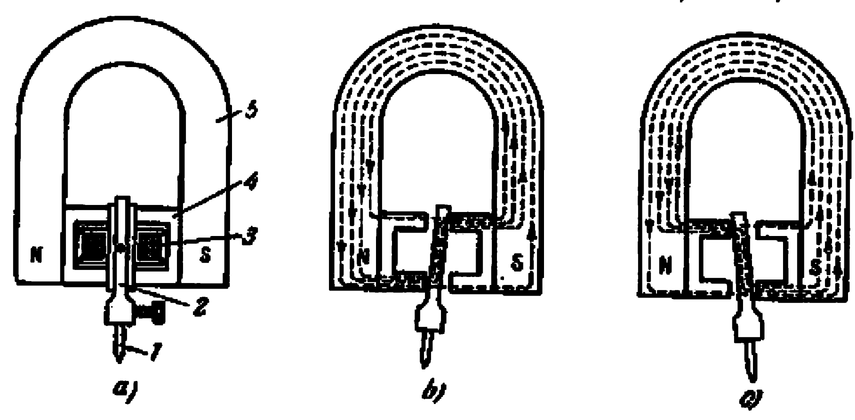


Fig. 120 | Lector electromagnético (fonocaptor): *a*, esquema de la estructura del instrumento: *1*, aguja; *2*, pequeño inducido; *3*, bobina; *4*, adaptadores de hierro; *5*, imán; *b* y *c*, esquemas de vibración de la aguja.

de vibraciones, un lector electromagnético (fonocaptor), cuyo esquema se da en la fig. 120, *a*. Utilizando el fonocaptor directamente para la reproducción de los sonidos, su aguja *1*, al deslizarse en el surco del disco, produce vibraciones que corresponden por la frecuencia y forma al sonido grabado. Junto con la aguja vibra un pequeño inducido *2* fijado dentro de la bobina *3* con un número grande de espiras. La bobina se encuentra en el campo magnético entre los adaptadores *4* de hierro de un imán permanente *5*; al vibrar el inducido, dentro de ella se induce una corriente alterna (fig. 120, *b*) que se suministra a un teléfono o un altavoz.

Para que el fonocaptor trabaje como vibrador, tiene que suceder al proceso contrario. Con estos fines por la bobina *3* se hace

[1]) Experimento 22.

pasar, por ejemplo, de un generador de ondas acústicas, una corriente alterna que engendra vibraciones del inducido y de la aguja *1*. Esta toca la pieza y provoca vibraciones con la misma frecuencia de la corriente que se suministra al vibrador.

2. Fonocaptor piezoeléctrico. Es cómodo transformar las frecuencias vocales por medio de un fonocaptor (captador) piezoeléctrico basado en el llamado efecto piezoeléctrico, es decir, producción de electricidad por presión. Dicho efecto consiste en lo siguiente: en las caras opuestas de ciertos cristales (cuarzo, sal de Seignette, etc.), al ejercer presión sobre ellos, aparecen cargas eléctricas iguales de magnitud, pero de signo opuesto. La magnitud de las cargas es proporcional a la presión, y los signos dependen de su dirección de través o a lo largo del cristal (fig. 121). Una plaquita tallada de tal cristal, cubierta en las caras opuestas con unas capas finas de metal (placas), es un elemento piezoeléctrico, en cuyas placas aparecen cargas con diferentes signos al aplicar la presión. Para que aparezcan distintas cargas durante la flexión, se utilizan elementos piezoeléctricos formados de dos plaquitas cristalinas, unidas (pegadas) consecutivamente, con placas en las caras exteriores. Durante la flexión en la placa de la cara cóncava aparecen cargas negativas, y en la placa de cara convexa, cargas positivas (fig. 122). A medida que aumenta la flecha, crecen las cargas y cambian el signo si varía la curvatura.

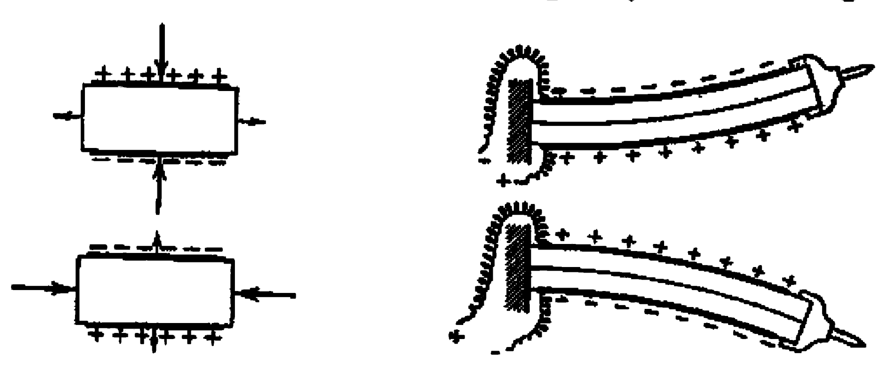


Fig. 121 | Efecto piezoeléctrico.

Fig. 122 | Cargas del elemento piezoeléctrico durante su flexión.

Tal elemento sujetado por un extremo y que tiene en el otro un portaagujas, es el fonocaptor piezoeléctrico. Cuando su aguja se apoya contra la pieza que vibra, el elemento vibra con la misma frecuencia y amplitud.

Las vibraciones mecánicas de la pieza se transforman en eléctricas que surgen en las placas del elemento y pueden registrarse mediante un oscilógrafo.

§ 9. OSCILÓGRAFOS

Por oscilógrafo se entiende un aparato automático registrador destinado para registrar magnitudes que se cambian rápidamente en el tiempo. Se distinguen dos grupos principales de oscilógrafos: electromagnéticos (de bucle) y de rayos catódicos.

En los oscilógrafos electromagnéticos el dispositivo de medición no es sino mecanismo del sistema electromagnético que se llama vibrador (bucle). La parte móvil del vibrador tiene cierto

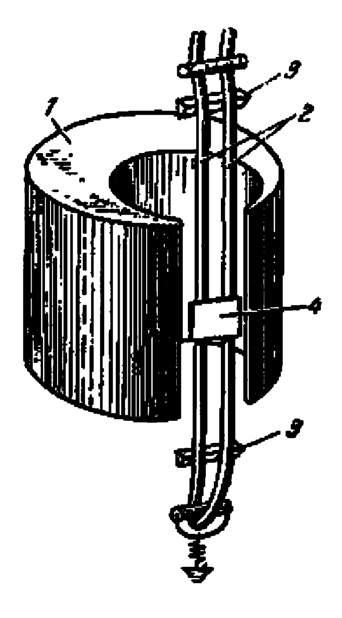


Fig. 123 | Vibrador electromagnético: *1*, imán; *2*, cintas; *3*, prismas aislantes; *4*, minúsculo espejo.

momento de inercia; por eso los oscilógrafos de bucle son instrumentos de inercia y son apropiados para la investigación de procesos periódicos, cuya frecuencia no sobrepasa de unos cuantos miles de Hz.

En los oscilógrafos catódicos la medición se realiza por medio de tubo catódico, en cuya pantalla se observa el fenómeno investigado. Los oscilógrafos catódicos prácticamente no tienen inercia y pueden emplearse para estudiar los procesos que se desarrollan con gran velocidad.

1. Oscilógrafo electromagnético. Consta de los siguientes elementos principales: un bloque de los vibradores, un sistema óptico, unos dispositivos para la observación y fotografiado.

Generalmente se fabrican oscilógrafos de tres, seis y ocho vibradores para poder observar y registrar unos cuantos procesos a la vez.

Un vibrador electromagnético (fig. 123) consta de un imán permanente *1*, en cuyo espacio de aire se encuentra un bucle hecho de una cinta tenue *2* de plata o bronce. El bucle se tensa sobre

unos prismas aislantes *3* y lleva pegado un minúsculo espejo *4*.

Si hacemos pasar por el bucle una corriente, en el tramo entre los prismas de apoyo *3* las cintas se encorvan en las direcciones contrarias por haber interaccionado la corriente con el campo magnético, y el espejo *4* gira alrededor de su eje vertical. Cuando la corriente es alterna, el espejo empieza a vibrar alrededor de este eje y junto con él vibra el rayo luminoso reflectado por el

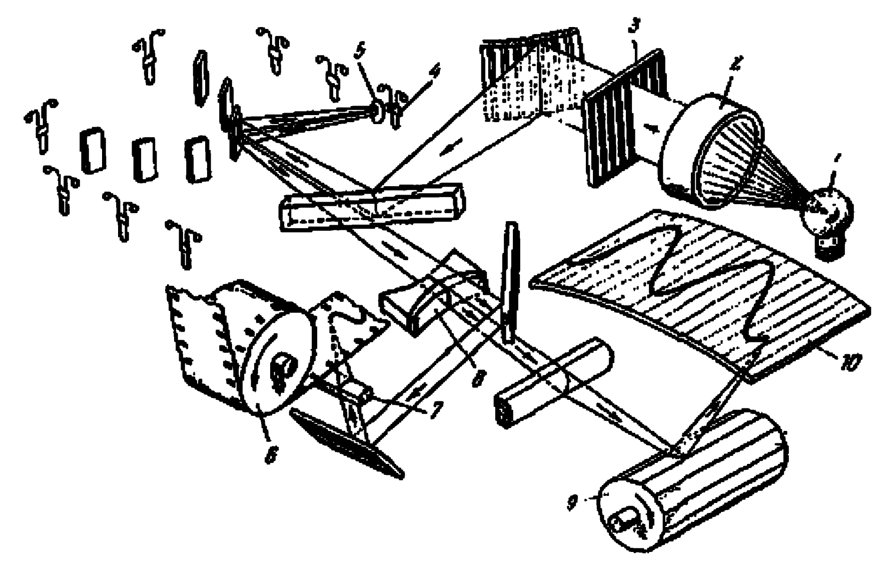


Fig. 124. Esquema del sistema óptico del oscilógrafo de ocho vibradores: *1*, bombilla; *2*, lente de condensación; *3*, diafragma; *4*, minúsculo espejo del vibrador; *5*, lente en la abertura de la caja del vibrador; *6*, tambor de la película; *7*, lente cilíndrica; *8*, lente de aumento; *9*, tambor de cristal multifacético; *10*, pantalla.

espejo. Estas vibraciones repiten las oscilaciones de la corriente que pasa por el bucle del vibrador.

El mecanismo del vibrador se aloja en una caja de plástico que al nivel del espejo tiene una abertura con una lente. Para una amortiguación rápida de las vibraciones del bucle, la caja del vibrador se llena de aceite especial.

Los oscilógrafos se dotan, por regla general, de vibradores con diferente frecuencia de oscilaciones naturales y diferente sensibilidad a la corriente para poder utilizar un vibrador que más corresponde a las condiciones del experimento.

El sistema óptico consta de un sistema de alumbrado destinado para distribuir rayos luminosos entre los vibradores y para alumbrar el espejo vibrante, un dispositivo (del espejo hasta el papel fotográfico) que garantiza un trazo fino y perfilado de la inscrip-

ción, y un dispositivo para la observación visual del fenómeno registrado.

El esquema principal del sistema óptico de un oscilógrafo de ocho vibradores (tipo МПО-2) puede verse en la fig. 124. De la bombilla *1* la luz pasa a través de una lente condensadora *2* y un diafragma *3* que divide el haz luminoso en rayos según el número de vibradores. Un rayo particular se dirige por un sistema de espejos hacia el minúsculo espejo *4* de uno de los vibradores a través de la lente *5* en la abertura de su caja. Luego, una parte del rayo vibrante, reflectado por el minúsculo espejo, se dirige por los espejos a través de una lente cilíndrica *7* y se enfoca sobre una película movida por el tambor *6*. La demás parte del rayo



Fig. 125 | Oscilogramas: *a*, de la vibración estudiada; *b*, marcador de tiempo.

vibrante pasa a través de una lente de aumento *8*, da con un tambor de cristal multifacético *9* y se reflecta de éste sobre una pantalla *10* de cristal mate para ser observada directamente. La marcha del rayo se muestra en la fig. 124 con flechas.

Si los tambores *6* y *9* están inmóviles, los reflejos luminosos del vibrador trazarán en la película y en la pantalla, al vibrar el minúsculo espejo *4*, unas rayas paralelas a las generatrices de los tambores. Cuando los tambores giran, en la pantalla en vez de una raya aparecerá una curva luminosa de oscilaciones, traduciéndose en la película después de su revelación por un oscilograma (fig. 125, *a*). El proceso de formación de la curva de vibraciones por medio de un tambor rotatorio se llama *exploración*. Los tambores son accionados por un motor eléctrico; generalmente la velocidad de rotación puede variar sensiblemente.

La escala de las ordenadas de la curva (amplitud de vibraciones) se determina por la sensibilidad del vibrador, y la escala de las abscisas (eje de tiempo), por un dispositivo especial llamado marcador de tiempo; sus oscilaciones perfectamente establecidas se fijan en la película en forma de una curva periódica (fig. 125, *b*). Uno de los vibradores puede hacer las veces del marcador de tiempo.

Existen varios tipos de oscilógrafos que difieren unos de los otros por la estructura de su diseño.

2. Oscilógrafo МПО-2 (MPO-2). El oscilógrafo universal electromagnético portátil МПО-2 [1]) es uno de los más perfectos instrumentos de bucle de esta índole. Se monta en una maleta de 30 × 38 × 20 cm. Su esquema óptico puede verse en la fig. 124.

Los ocho vibradores del oscilógrafo se sitúan en tres lados de una ranura rectangular. Los vibradores no necesitan ningún ajuste, son intercambiables y se conectan automáticamente en el circuito luego de ponerlos en sus alojamientos. Tanto las sacudidas exteriores como las vibraciones del motor no se transmiten a los vibradores a causa de un amortiguamiento bueno del bloque con los alojamientos para los vibradores; esto permite utilizar el oscilógrafo en todas las condiciones. Los bucles de los vibradores tienen una frecuencia de oscilaciones naturales en el aire desde 1200 hasta 10 000 Hz.

Un zumbador acústico armado dentro de la caja del vibrador y sintonizado con una frecuencia de 500 Hz hace las veces del marcador de tiempo. Es posible también utilizar para estos fines uno de los vibradores, haciendo pasar por éste una corriente alterna de la red urbana de 50 Hz.

El registro se efectúa sobre una película, cuya alta sensibilidad y resistencia permiten, teniendo una bombilla de poca potencia (6 V), obtener una inscripción fina y menuda con una velocidad grande sin ningún daño para la nitidez. La velocidad de movimiento de la película se regula por medio de una caja de velocidades y varía desde 0 hasta 5 m/s. La incandescencia de la bombilla se establece de acuerdo con la velocidad de movimiento de la película.

La película es accionada por medio de un motor asincrónico, alimentado por una corriente alterna monofásica de 127 ó 220 V. El acoplamiento del motor con el mecanismo de arrastre de la cinta se realiza mediante un embrague electromagnético, cuyo mando puede sacarse fuera del oscilógrafo, previendo con este fin unos bornes especiales. Esto permite efectuar la toma de imagen automática y a distancia.

La fuente de alimentación puede ser reemplazada por un motor de corriente continua de 24 V, poniéndose simultánea y automáticamente a 24 V el embrague electromagnético, la bombilla y el contador de tiempo.

El oscilógrafo МПО-2 consta de unos dispositivos automáticos especiales. Uno de ellos es el regulador de la longitud del cuadro que detiene el movimiento de la película al pasar ésta una longitud determinada, establecida de antemano desde 0,1 hasta 5 m. El otro dispositivo cierra o abre automáticamente los contactos, a

---

[1]) El diseño es de los ingenieros V. O. Arutiunov, N. I. Voscoboinikov, A. M. Damski y B. A. Seliber.

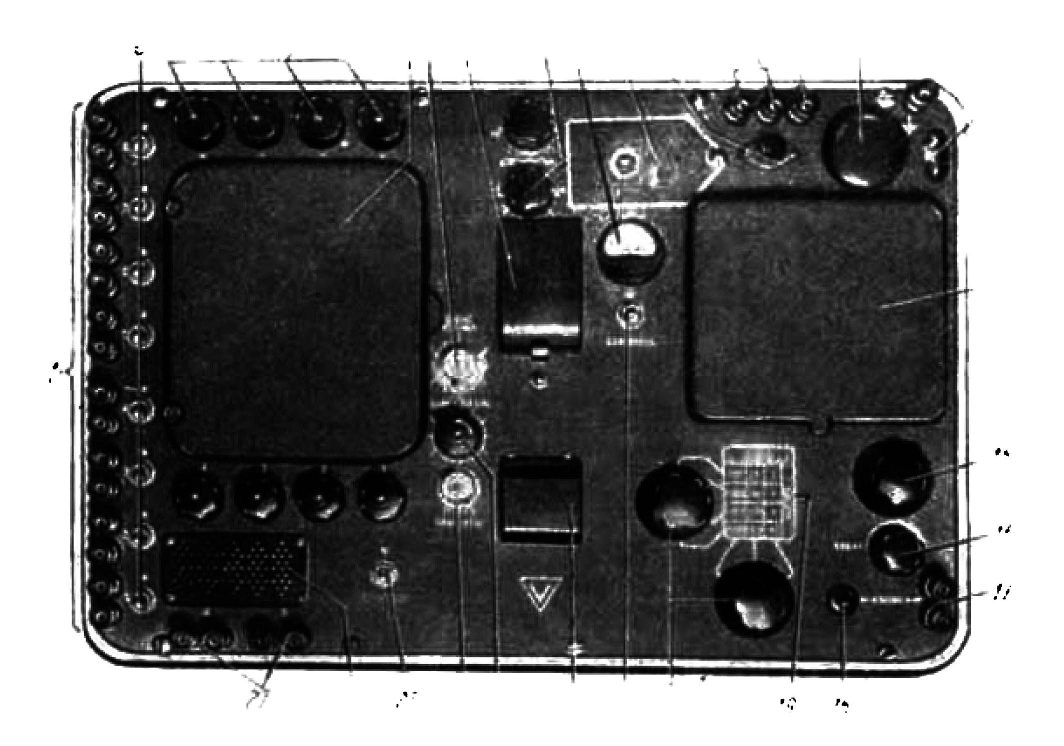


Fig. 126 | Tapa interior del oscilógrafo МПО-2 con tablero de mando y dispositivos de señalización: *1*, bornes de los vibradores; *2*, interruptores de conexión de los vibradores; *3*, manecillas para hacer girar los vibradores; *4*, alojamientos para los vibradores; *5*, indicador de reserva de película; *6*, carrete colector; *7*, manecilla para regular el diafragma; *8*, voltímetro; *9*, bombilla; *10*, bornes de los contactos de la red investigada; *11*, fusible; *12*, regleta de conexión; *13*, enchufe; *14*, pantalla; *15*, manecilla para regular la exploración; *16*, manecilla del reóstato de conexión de la incandescencia; *17*, bornes del fotografiado a distancia; *18*, botón del fotografiado; *19*, tabla de las velocidades; *20*, manecillas de la caja de velocidades; *21*, interruptor del motor; *22*, carrete; manecilla de la longitud del cuadro; *24*, regulador de los contactos; *25*, interruptor del marcador de tiempo; *26*, rejilla; *27*, bornes de los vibradores de potencia.

través de los cuales se aplican al oscilógrafo las señales del proceso estudiado, en el momento dado después de haber comenzado el movimiento de la película. Estos dispositivos permiten coordenar con exactitud el inicio y el final del registro con la longitud del cuadro. Además, existe un indicador de la reserva de película.

Todo el mando del oscilógrafo se sitúa en la tapa interior de la maleta (fig. 126). La conexión a la red de corriente alterna se efectúa en el enchufe *13* mediante un cordón con clavija directa e inversa. Antes de encender el oscilógrafo, la regleta de conexión *12*

se pone en la tensión 127 ó 220 V y el fusible *11* de 2 A. Si la corriente es continua de 24 V, es preciso cambiar el motor y la regleta de conexión y poner el fusible de 6 A.

El oscilógrafo se enciende moviendo la manecilla *16* del reóstato de la incandescencia de la bombilla, conectándose simultáneamente el voltímetro y encendiéndose el "ojo" de control en la tapa de la bombilla *9*. La incandescencia de la bombilla se establece con la misma manecilla *16*, guiándose por el voltímetro *8*; para las velocidades mínimas de movimiento de la película la incandescencia es de 2—3 V, para las máximas, de 7—8 V.

Los vibradores se eligen de tal manera que sus frecuencias propias sean tres o cuatro veces mayores que las frecuencias del proceso estudiado, y se insertan en cualquiera de los alojamientos *4* ubicados bajo una tapa. Estos se conectan a la red estudiada mediante los bornes *1* y se encienden con los interruptores *2*. El marcador de tiempo se introduce en el alojamiento № 1 y se conecta mediante el interruptor *25*. Si en calidad de marcador de tiempo se utiliza uno de los vibradores, éste se conecta por medio de su borne correspondiente *1* a la red de corriente alterna de 50 Hz. Los alojamientos № 4 y 5 de los vibradores son destinados además para los llamados vibradores de potencia que permiten investigar las oscilaciones de la potencia, medir la cantidad de la energía gastada, determinar la potencia instantánea, etc. En este caso los vibradores de potencia se conectan a la red mediante los bornes *27*.

El diafragma se regula mediante las manecillas *7*; la de abajo es para los alojamientos № 1—4; la de arriba, para los alojamientos № 5—8. Para estudiar procesos lentos se utiliza el diafragma con ranura estrecha; para los procesos rápidos la ranura se aumenta.

La colocación del oscilograma en la película se efectúa moviendo los vibradores mediante las manecillas *3*. Simultáneamente los reflejos luminosos, reflejados por los vibradores, se desplazan por la vertical (por el eje de las ordenadas) en la pantalla *14*. Esta tiene dos viseras laterales para mejorar la visibilidad. Las curvas se observan en la pantalla *14* solamente cuando las velocidades de movimiento del tambor son a partir de 250 mm/s en aumento. La velocidad de rotación del tambor de espejo (exploración) se varía mediante la manecilla *15*.

El mando de la caja de velocidades se efectúa con el motor parado por medio de las manecillas *20*, las cuales deben primeramente levantarse para arriba y luego ser movidas de tal manera que la velocidad deseada de movimiento de la película se encuentre en la intersección de sus indicadores en la tabla *19*.

La película enrollada con la emulsión hacia afuera se introduce en el carrete en un cuarto oscuro. El carrete tiene una capacidad

de 5 m de película. Al quitar la tapa del carrete e introducir la película, se deja afuera un cabo de 10—15 cm de longitud para que luego, poniendo el carrete *22* en su alojamiento, se pueda insertar la película en la ranura entre las guías del mecanismo de arrastre y enganchar la perforación en los dientes del tambor conductor. Este, simultáneamente con la colocación del carrete, se acopla automáticamente con el motor. El carrete colector *6* se pone en el alojamiento y se le abre la ranura para la película. Toda la película de 5 m de longitud pasa del carrete suministrador al carrete colector solamente cuando la velocidad de movimiento no sobrepasa de 2 m/s. Si la velocidad es de 5 m/s, no se logra bobinar en el cargador colector más de 1,5 m de película. Antes de efectuar el registro, se establece la longitud del cuadro mediante la manecilla *23* y se pone en marcha el motor con el interruptor *21*. Se puede poner el regulador *24* en una longitud de la película, pasando la cual se conectan automáticamente los contactos de la red investigada enchufados en este caso en los bornes *10*, dos de los cuales sirven para desconectar la corriente y dos, para cortocircuitarla.

El registro se realiza oprimiendo el botón *18* que conecta el mecanismo de arrastre de la película sólo cuando la manecilla *23* se pone en cualquier posición de 0 a 5 m. Haciendo esto, durante todo el tiempo del fotografiado debajo de la rejilla *26* aparece una señal luminosa y se mueve la manecilla *5* que marca la reserva de película. El fotografiado se interrumpe automáticamente tan pronto que se acaba la longitud establecida del cuadro o se suelta el botón *18*. Los bornes *17* sirven para el mando del fotografiado a distancia.

3. Osciloscopios catódicos. Los osciloscopios catódicos se emplean ampliamente para la observación y el fotografiado de las curvas de tensión e intensidad de la corriente, cuando las frecuencias de oscilaciones son muy altas, inalcanzables para los oscilógrafos de bucle. Los osciloscopios catódicos permiten también investigar fenómenos impulsivos de bastante poca duración. Tales osciloscopios son instrumentos que reaccionan al cambio de la tensión de la corriente, y por eso cualesquiera de los fenómenos eléctricos o no eléctricos que pueden transformarse en el cambio de la tensión de la corriente, se investigan mediante el osciloscopio catódico.

El elemento principal de medición de un osciloscopio catódico es el tubo catódico. Sus principales ventajas, en comparación con los vibradores, son un gasto ínfimo de la potencia de la fuente de tensión investigada y falta de inercia. El osciloscopio catódico permite investigar procesos, cuya frecuencia alcanza centenares de megahertzios.

El funcionamiento del osciloscopio se funda en la propiedad de los electrones que están en movimiento de cambiar la dirección bajo la acción de fuerzas eléctricas o magnéticas, por ejemplo, al pasar el espacio entre dos placas paralelas cargadas. Existe una analogía completa entre un haz de electrones que pasa a través de los campos eléctricos y un rayo luminoso que pasa a través de los medios refringentes. Por eso los sistemas destinados para desviar el haz de electrones se llaman lentes o prismas electrónicos y la óptica electrónica cubre las leyes de desviación del movimiento de los electrones.

Los tubos catódicos difieren por el método de la obtención del haz de electrones acelerados: los hay a cátodo frío (tubos de alta

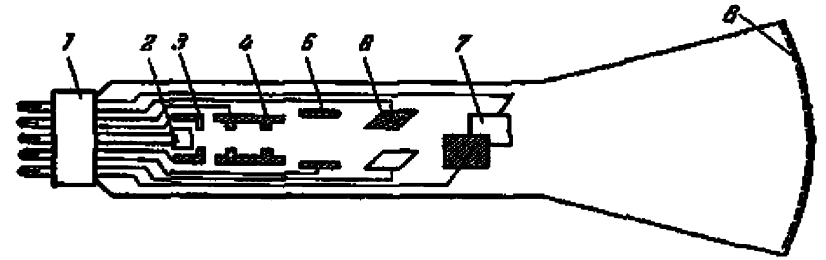


Fig. 127 | Tubo de rayos catódicos; *1*, zócalo; *2*, cátodo; *3*, rejilla; *4*, primer ánodo (de enfoque); *5*, segundo ánodo (de aceleración); *6*, placas de deflexión vertical; *7*, placas de deflexión horizontal; *8*, pantalla.

tensión) y a cátodo caliente (tubos de baja tensión). Ultimamente tienen mayor aplicación tubos a cátodo caliente.

El tubo de rayos catódicos (fig. 127) no es sino una ampolla de forma cónica con cuello alargado que se termina con un zócalo *1* que tiene terminales metálicos. Al principio del cuello se sitúa el cañón electrónico, dispositivo propio para crear un haz enfocado de electrones. La fuente de electrones consta de un cátodo de caldeo *2*, hecho en forma de un cilindro menudo con la capa emisora en su superficie de tope, y situado dentro de la llamada rejilla *3* que no es sino un cilindro de metal con un orificio de salida de un diámetro pequeño. La rejilla tiene respecto al cátodo un potencial negativo, variando el cual se puede regular la densidad de los electrones en el haz y de este modo cambiar la intensidad de la mancha luminosa catódica. Los electrones que salen del cátodo incandescente se propagan, merced a la rejilla, en forma de un haz estrecho, rayo catódico. Así se realiza el enfoque previo del rayo.

El cañón electrónico consta también de los cilindros *4* y *5*, a los cuales se aplica un potencial positivo respecto al cátodo. Los cilindros *4* y *5* se llaman primero y segundo ánodo respectiva-

mente. El potencial del primer ánodo es variable, lo que garantiza el enfoque difinitivo del rayo catódico; para mejorarlo, el primer ánodo, igual que la rejilla, está dotado de un diafragma con un orificio pequeño. Los electrones se aceleran por haber surgido entre el cátodo y el ánodo una diferencia de potenciales. La velocidad final de los electrones se determina por el potencial del segundo ánodo que a diferencia del primer ánodo de enfoque se llama también acelerador. En el proceso del funcionamiento del tubo catódico el potencial del ánodo acelerador se mantiene, como regla general, invariable.

Del cañón electrónico el haz de rayos catódicos alcanza la superficie interior de la parte ensanchada de la ampolla que se llama pantalla *8*. Esta se cubre con unas composiciones que tienen la propiedad de volverse luminiscentes al ser heridas por los rayos catódicos. Según la composición que cubre la pantalla, la luminiscencia puede durar ya mientras permanezca el rayo, ya un tiempo después de su desaparición.

Entre el cañón y la pantalla se sitúan placas deflectoras (prismas electrónicos), dos en los planos horizontales, electrodos de deflexión vertical *6*, y dos en los verticales, electrodos de deflexión horizontal *7*. Al aplicar tensiones alternas simultáneamente a ambos pares de placas deflectoras, el rayo catódico va a trazar en la pantalla unas curvas llamadas figuras de Lissajous. La forma de estas figuras depende del defasaje, de la correlación de las amplitudes, de las frecuencias y formas de las curvas de tensiones que se aplican a las placas. Aplicando a un par de placas una tensión, cuya amplitud, frecuencia y forma de la curva son conocidas, y a otro par, una tensión relacionada con el proceso investigado, se puede por la obtenida figura de Lissajous tener una idea sobre la frecuencia y el defasaje del fenómeno estudiado y construir una curva correspondiente.

El proceso de obtención en la pantalla de unas curvas que caracterizan el cambio de las tensiones aplicadas a las placas del tubo, se llama barrido. Para que exista la posibilidad de observar en la pantalla directamente la curva de la tensión investigada, se hace uso del llamado barrido continuo (lineal) de tiempo. Con este propósito las placas de deflexión horizontal son alimentadas por una corriente de dientes de sierra (fig. 128). Durante un período T esta tensión al principio crece o decrece uniformemente hasta un valor determinado, luego casi instantáneamente regresa a su magnitud inicial. La mancha luminosa se desplaza en la pantalla por la horizontal con una velocidad determinada constante y regresa rápidamente al origen de la recta. Si a la vez se aplica a las placas de deflexión vertical la tensión investigada, el rayo catódico describirá en la pantalla la curva de esta tensión.

El tiempo de decrecimiento de la tensión de dientes de sierra que en la pantalla corresponde al retroceso de la mancha por la horizontal, tiene que formar una parte bastante pequeña de su período completo T para que la más mínima parte del fenómeno estudiado transcurra durante el tiempo t_{ret} de retroceso del rayo catódico. Además, se puede ennegrecer el retroceso, y entonces los fenómenos que transcurren durante el retroceso no se interponen sobre la curva de la marcha principal del rayo catódico.

Al coincidir el período de la tensión investigada con el tiempo del desplazamiento horizontal completo del rayo, en la pantalla aparecerá una curva que corresponde a un período. Si la frecuencia de la tensión investigada sobrepasa n veces la frecuencia de la tensión de dientes de sierra, la curva en la pantalla abarcará n períodos y en el caso general irá desplazándose por

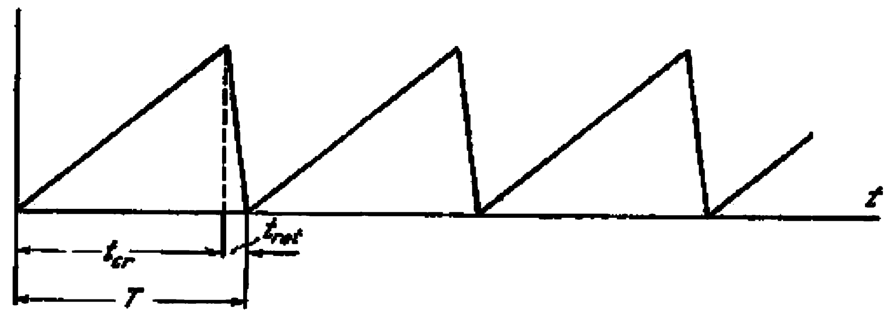


Fig. 128 | Tensión de dientes de sierra.

la pantalla en la dirección horizontal. En el caso particular, cuando la relación de las frecuencias de ambas tensiones que se aplican a las placas es par, la curva de la tensión investigada siempre va a nacer en un mismo punto por la horizontal, y su imagen en la pantalla será inmóvil y cómoda para una investigación detallada. Tal elección de las frecuencias de las tensiones que se aplican al tubo se llama sincronización.

Para los procesos que transcurren durante un tiempo muy breve (impulsivos) se utiliza el llamado barrido de disparo que funciona como sigue: junto con el inicio del impulso aplicado a las placas de deflexión vertical, a las placas de deflexión horizontal se aplica en una escala determinada una corriente que desaparece al final del impulso. Luego esta corriente como si esperara un impulso nuevo para repetir el proceso. Así, pues, se garantiza la sincronización de las tensiones y la escala de la desviación horizontal es la medida de la duración del impulso.

Para obtener la tensión deseada se utiliza el llamado generador de barrido, que es uno de los bloques más importantes del

osciloscopio. El esquema eléctrico del osciloscopio puede verse en la fig. 129. Generalmente en ellos se emplea el generador de barrido *3* de la tensión de dientes de sierra, pero para investigaciones especiales (por ejemplo, figuras de Lissajous) es cómodo un barrido circular o espiral. Se utiliza también un barrido de disparo que permite determinar la forma de los impulsos instantáneos cuando cambia su duración y amplitud. A veces los esquemas eléctricos de barridos especiales se hacen en forma de

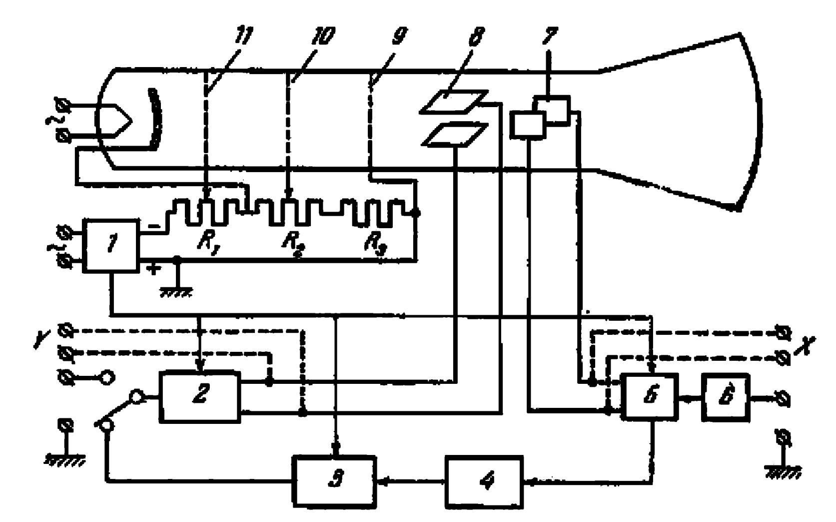


Fig. 129 | Esquema de un osciloscopio catódico: *1*, rectificador; *2*, amplificador; *3*, generador de barrido; *4*, sincronizador; *5*, amplificador; *6*, debilitador; *7* y *8*, placas de deflexión horizontal y vertical; *9* y *10*, segundo y primer ánodo; *11*, rejilla.

adaptadores particulares, cuya tensión se aplica a las placas de deflexión horizontal con el generador *3* de la tensión de dientes de sierra desconectado. Para aplicar la tensión directamente a las placas deflectoras sirven las entradas especiales *X* e *Y* (véase la fig. 129).

Existen varios esquemas de los generadores de barrido que garantizan la obtención de oscilaciones en una gama de frecuencias muy amplia, desde bajas hasta muy altas. Variando la frecuencia del generador de barrido, se logra la sincronización de las frecuencias del barrido y la señal, haciendo inmóvil la imagen en la pantalla. El esquema de un dispositivo eléctrico para tal sintonización de las frecuencias se llama sincronizador. La sincronización puede ser interna, cuando para el barrido se suministra una parte de la tensión investigada amplificada, o externa, cuando al generador de barrido se le conecta la tensión exterior sincroni-

zante. Si la tensión exterior se toma de la red, la sincronización se llama industrial.

La sensibilidad de los tubos catódicos es muy pequeña (alrededor de 0,1 mm por 1 V) y requiere la amplificación de las tensiones. La desviación suficiente del rayo catódico se logra en los osciloscopios utilizando los amplificadores *2* y *5* que, generalmente, son del tipo reóstato-capacidad. Los amplificadores aumentan la sensibilidad de los osciloscopios por la tensión hasta un valor del orden de unidades y decenas de centímetros por 1 V.

El coeficiente de amplificación de la tensión que se suministra por el amplificador *2* a las placas *8* de deflexión vertical, puede regularse. Supera mucho al coeficiente de amplificación del amplificador *5* de las placas *7* de deflexión horizontal, ya que el generador de barrido engendra la tensión con una amplitud tan grande que no pocas veces no hay necesidad de amplificarla. A veces se debe hasta disminuir la tensión de dientes de sierra, lo que se consigue mediante un debilitador *6*.

Todos los elementos del osciloscopio se alimentan de la red de corriente alterna a través de un rectificador *1*. La alimentación del tubo catódico viene del divisor de tensión $R_1 — R_2 — R_3$. El divisor de tensión R_1 sirve para dirigir la intensidad de la mancha electrónica mediante el cambio de la tensión aplicada a la rejilla *11*; el divisor R_2 dirige el enfoque en el primer ánodo *10*. El divisor (resistencia) R_3 asegura la superación cuatro-seis veces de la tensión continua del segundo ánodo *9* en comparación con el primer ánodo.

El osciloscopio catódico se usa mucho para medir e investigar los procesos eléctricos y no eléctricos más diversos. Para que el estudio de diferentes procesos sea más cómodo, los osciloscopios se fabrican de varios tipos que se distinguen entre sí por los detalles de algunos dispositivos.

4. Osciloscopio catódico del tipo ЭО-6М (EO-6M). El osciloscopio ЭО-6М permite observar las curvas de los procesos periódicos y las figuras de Lissajous, examinar los impulsos, medir su duración y la amplitud. Este oscilógrafo consta de las siguientes partes: tubo catódico; amplificadores de deflexión vertical y horizontal (con sincronización); generador de barrido continuo (de dientes de sierra) y de disparo; calibradores de amplitud y de duración de los impulsos; bloque de alimentación con el divisor de tensión.

La sensibilidad de los amplificadores (cuando la frecuencia es de 100 kHz) es no menor de 24 y 30 mm por 1 V de tensión efectiva para la desviación vertical y horizontal respectivamente. El barrido continuo tiene seis gamas de frecuencia en el intervalo de 2 Hz a 200 kHz, el de disparo, cuatro gamas para examinar

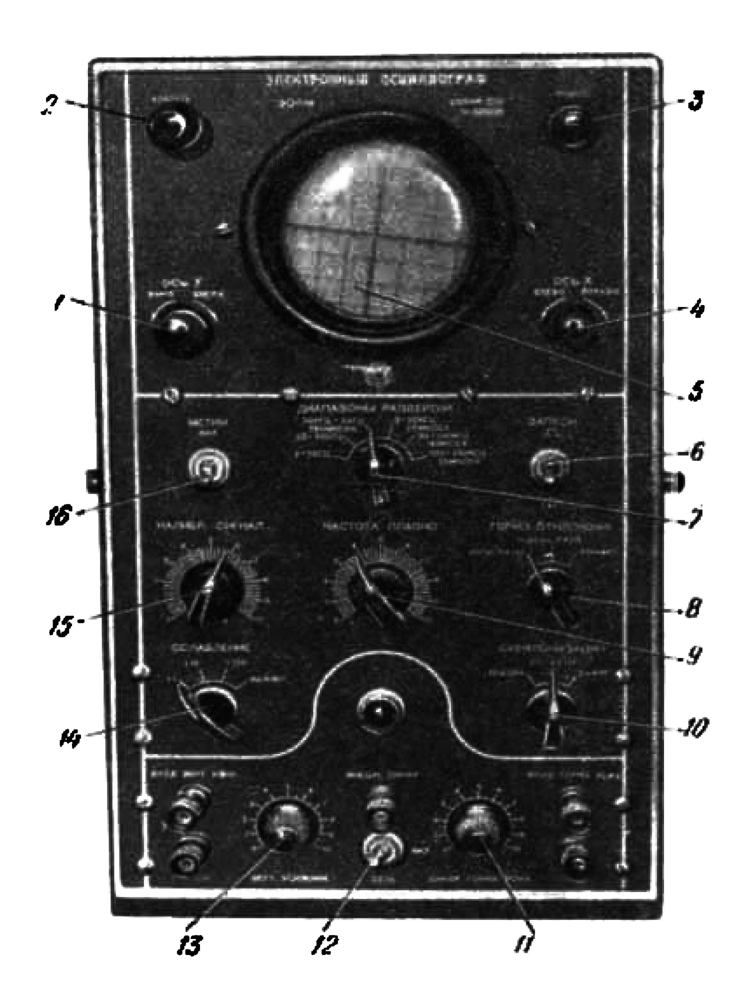


Fig. 130 | Panel delantero del osciloscopio ЭО-6М (EO-6M) con órganos de mando: *1*, *2*, *3* y *4*, manecillas de mando del rayo catódico; *5*, pantalla; *6*, interruptor de suministro del impulso de disparo del barrido de disparo; *7*, *8* y *9*, conmutadores de mando del generador de barrido; *10* y *11*, conmutador y manecilla de mando de la sincronización; *12*, interruptor de conexión en la red; *13*, amplificación de la desviación vertical; *14*, regulación de la señal de entrada; *15* y *16*, mando de los calibradores.

impulsos con una duración desde 0,5 hasta 250 μs y con una frecuencia de marcha desde 100 Hz hasta 10 kHz.

El osciloscopio ЭО-6М se ensambla sobre un chasis especial situado dentro de una caja metálica. El chasis consta de un

tablero vertical (pared delantera de la caja) donde están agrupados todos los órganos de mando con sus iscripciones correspondientes, y de dos paneles horizontales donde están situados el tubo catódico, bombillas de los amplificadores, rectificadores del generador de barrido, transformadores y las demás piezas.

La alimentación se suministra de la red de corriente alterna de 115, 127 ó 220 V con una frecuencia de 50 ó 400 Hz. Antes de conectar el instrumento en la red es imprescindible poner el conmutador, ubicado en la pared de atrás de la caja, en la tensión de la red y poner el fusible correspondiente de 2 A para la tensión de 115 ó 127 V o de 1 A para 220 V.

Se distinguen los siguientes grupos de órganos de mando situados en la pared delantera del osciloscopio (fig. 130): órganos de mando del rayo catódico, de las exploraciones, de la sincronización, de la señal de entrada y amplificación, de la amplitud y duración de los impulsos, órganos auxiliares.

El mando del rayo catódico se efectúa por medio de las manecillas *1*, *2*, *3*, *4*. La manecilla *3* sirve para enfocar la imagen; la manecilla *2*, para poner la intensidad de tal modo que la imagen en la pantalla *5* esté más clara. Por medio de las manecillas *4* y *1* se puede desplazar la imagen por la horizontal (eje x) y la vertical (eje y) respectivamente; esto permite situar la imagen en el lugar necesario de la pantalla *5* del tubo catódico.

El generador de barrido se gobierna mediante los conmutadores *7* y *8* y la manecilla *9*. Para seleccionar el tipo de barrido —continuo o de disparo— sirve el conmutador *8* con la inscripción "desviación horizontal". Al poner éste en la marca "amplificador", se desconecta el generador de barrido, aplicando a la vez el amplificador de sincronización a las placas verticales del tubo, lo que permite aumentar la desviación horizontal del rayo excepto del barrido. Mediante el conmutador *7* se pone la gama necesaria del barrido continuo o de disparo. La manecilla *9* con la inscripción "frecuencia suave" ofrece la posibilidad de variar la frecuencia propia del barrido continuo y la duración del disparo dentro de la gama elegida.

La sincronización de las tensiones se efectúa mediante el conmutador *10*, la manecilla *11* y el interruptor *6*. El conmutador *10* hace posible determinar el género de la sincronización, o sea, el interior (de la señal investigada), el exterior (por la señal exterior sincronizada con la investigada) o el de la red. Mediante la manecilla *11* con la inscripción "sincronización de la amplificación horizontal" se regula la tensión sincronizadora y con el generador de barrido desconectado, la tensión de desviación horizontal. El interruptor *6* con la inscripción "disparo" sirve para suministrar el impulso de disparo del barrido de disparo.

La regulación de la señal de entrada se hace mediante el conmutador *14* con la inscripción "atenuación". Este permite atenuar la señal estudiada a razón de 1 : 1, 1 : 10 y 1 : 100. La manecilla *13* puede servir para el aumento suave de la desviación vertical desde cero hasta el valor máximo.

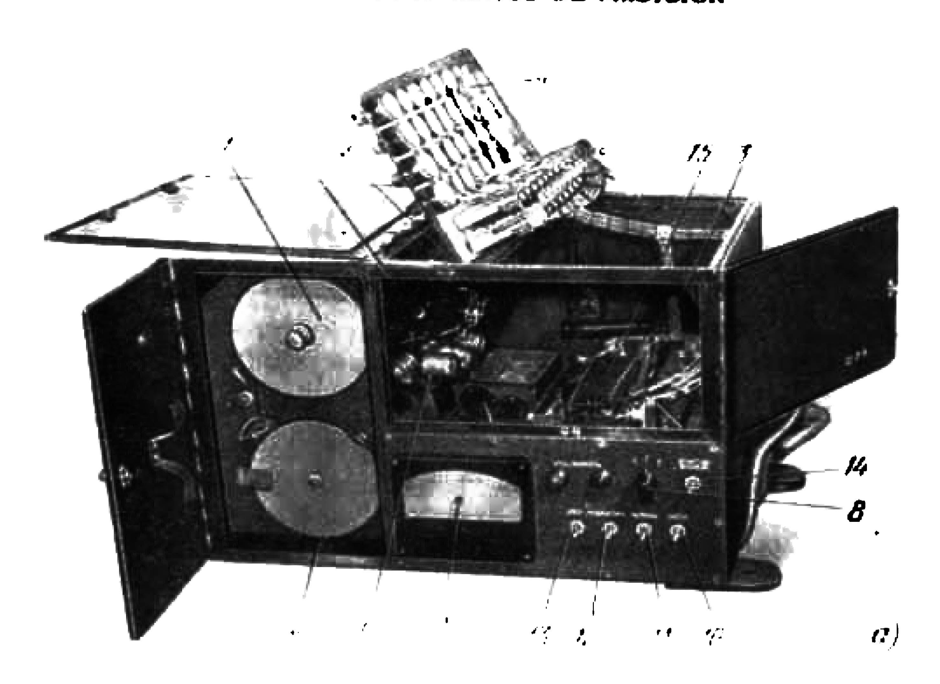
El mando de los calibradores de duración y de amplitud del impulso se efectúa mediante el interruptor *16* y la manecilla *15*. Al conectar el interruptor *16* con la inscripción "marcas" en la pantalla *5* junto con el impulso aparecerán marcas de calibración en forma de rayas luminosas con intervalos oscuros. Conociendo la cantidad de marcas que caben sobre el impulso y el valor de cada marca, es fácil determinar la duración del impulso. El valor de la marca depende de la gama del barrido de disparo y es igual a 0,5 μs, 1 μs, 5 μs y 20 μs de las cuatro gamas correspondientes. Por medio de la manecilla *15* "señal de calibración" se elige la amplitud de la tensión estabilizada igual a la amplitud de la señal estudiada, o que difiere de ésta en una relación determinada. Luego, de acuerdo con la división de la escala en donde se para el indicador de la manecilla *15*, se determina el valor de la amplitud del impulso por el diagrama pegado al dorso de la tapa delantera del osciloscopio.

Los órganos complementarios de mando son como sigue: el interruptor *12* con la inscripción "red" para conectar el instrumento en la red; los bornes con las inscripciones "entrada de ampl. vert." para la tensión investigada; "sincron. ext.", para la tensión sincronizadora exterior; "entrada de ampl. hor.", para observar las figuras de Lissajous; "tierra", para conectar cajas de los objetos investigados.

En vista de que el osciloscopio tiene un mando complicado, su manejo necesita experiencia. Para evitar el deterioro del instrumento y con el fin de obtener unos resultados verídicos, se permite hacer uso del osciloscopio sólo después de su estudio detallado, siempre y cuando las exigencias de la instrucción sean cumplidas, o bajo observación de especialistas experimentados.

5. Oscilógrafo magnetoeléctrico OT-24-51. El oscilógrafo magnetoeléctrico multicanal de la fábrica "Gueofísica" del tipo OT-24-41 (fig. 131, *a*) tiene los vibradores de bastidor agrupados en el bloque del electroimán, y es destinado para la extensometría en la gama de frecuencias bajas sin amplificación intermedia.

El empleo de los vibradores de bastidor permite obtener una sensibilidad (expresada en mm/mA) del mismo orden que la de los galvanómetros estacionarios de corriente continua. El amortiguamiento se efectúa merced al momento electromagnético, por eso durante el trabajo con tales galvanómetros la magnitud de la resistencia exterior se aproximará a la crítica.



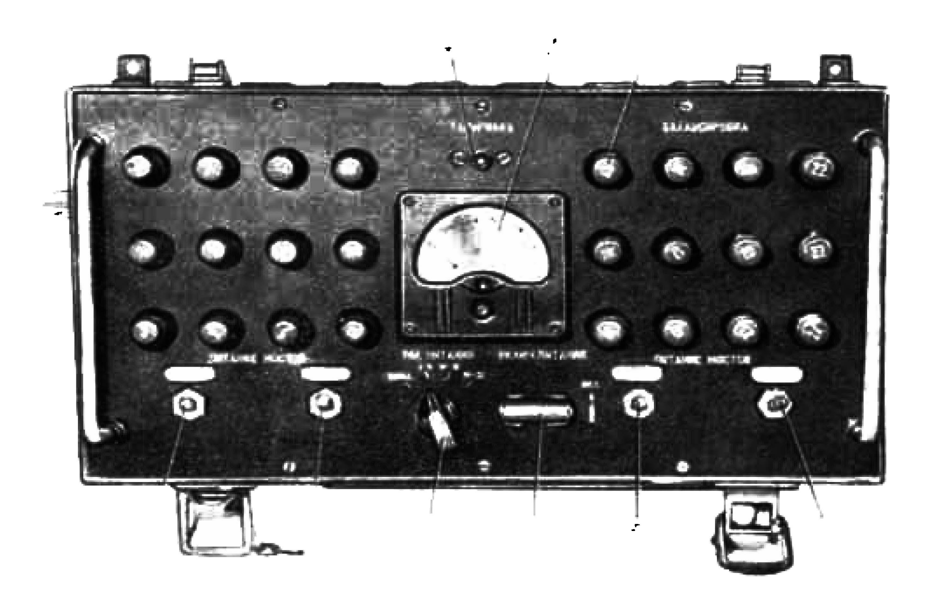


Fig. 131 | Oscilógrafo magnetoeléctrico OT-24-51: *a*, oscilógrafo; *b*, bloque de equilibrado (panel superior).

La potencia gastada por los vibradores de bastidor es mucho menor que la gastada por los vibradores de bucle. Prácticamente, todos los vibradores de bastidor son aptos para el trabajo con extensómetros sin recurrir a los amplificadores. La frecuencia del proceso investigado es limitada por decenas de hertzios (tabla 42).

Tabla 42

Tipo del vibrador	Frecuencia de vibraciones propias en el aire, Hz	Resistencia, Ω	Corriente cuando la desviación en el papel es de 100 mm, mA	Potencia gastada para la desviación sobre papel de 100 mm, W
I	400	56	0,5	$14 \cdot 10^{-6}$
II	200	56	0,1	$0,56 \cdot 10^{-6}$
III	130	56	0,05	$14 \cdot 10^{-8}$
IV	70	44,5	0,01	$0,45 \cdot 10^{-8}$
V	25	36	0,002	$1,44 \cdot 10^{-10}$

El oscilógrafo tiene 24 canales para las mediciones extensométricas y 3 canales para marcas auxiliares.

El registro se lleva sobre un papel de 200 mm de ancho. La velocidad del registro varía de 5 mm/s a 1 m/s mediante un reductor de escalones. Un marcador de tiempo especial funcionando con ayuda de un interruptor de diapasón, ofrece la posibilidad de contar los intervalos de tiempo de 0,01 s. Tanto el motor para mover el papel fotográfico como el electroimán (único para todos los vibradores) y las bombillas de iluminación de los vibradores se alimentan de la red de corriente continua (24 V de tensión). Los puentes se alimentan de las fuentes independientes, cuya tensión puede elegirse según la resistencia de los captadores empleados.

El oscilógrafo está dotado de un bloque especial de equilibrado (fig. 131, *b*) que permite realizar la compensación de los puentes, si la diferencia de las resistencias de los captadores no sobrepasa de ± 1%. Además, el bloque de equilibrado tolera la alimentación de los puentes por separado (interruptores *5*). Con el miliamperímetro *1*, mediante el conmutador *2* "corriente de alimentación", se puede determinar las corrientes de cada grupo de puentes. Está previsto el interruptor maestro de alimentación *3* y un dispositivo especial de calibración que, al oprimir el botón *4* "calibración", permite trazar los impulsos de calibración sobre el oscilograma. La conexión del bloque de equilibrado con el oscilógrafo y los puentes se efectúa mediante unos cables con enchufes

En la fig. 131, *a* puede verse el oscilógrafo con las puertecillas del panel delantero abiertas; las cifras señalan lo siguiente: *1*, cargador; *2*, carrete colector; *3*, vibradores puestos en el bloque del electroimán *15*; *4*, shunts de los vibradores que permiten regular su sensibilidad; *5*, marcador de tiempo; *6*, alumbrador de los espejos de los vibradores. Cambiando la posición de la manecilla *8*, mediante el instrumento *7* puede determinarse la tensión de alimentación del oscilógrafo, la magnitud de la corriente de imantación y, por último, la magnitud de la resistencia exterior conectada a cualquiera de los vibradores; para determinar esta magnitud es necesario oprimir el botón *9* con el número del canal comprobado.

Los interruptores *10*, *11*, *12* y *13* (fig. 131, *a*) conectan respectivamente el motor de arrastre del papel; el calentamiento excesivo de los alumbradores *6*, si esto se necesita para el trabajo; el electroimán del bloque de vibradores y la alimentación de los alumbradores *6*. El marcador de tiempo se conecta mediante su propio interruptor *14*.

Para el estudio de las deformaciones se necesita pegar al objeto de investigaciones los captadores activos y de compensación y armar el esquema completo del puente corriente. Los puentes se alimentan por medio del bloque de equilibrado, después del cual en la diagonal de medición se conecta directamente el vibrador. El regulador de sensibilidad *4* (fig. 131, *a*) del vibrador se pone en la posición que asegura una sensibilidad mínima. Oprimiendo el botón *9* con el número del canal, se determina mediante el instrumento *7* la magnitud de la resistencia equivalente del circuito exterior. Si corresponde al valor calculado, por medio del botón *9* se desconecta el instrumento *7*, y en vez de él se conecta el vibrador correspondiente. Hecho esto, con uno de los interruptores *5* del bloque de equilibrado (fig. 131, *b*) se suministra la alimentación al puente de medición. Se conectan los interruptores *13* y *12* y con el instrumento *7* se comprueban la tensión de alimentación del oscilógrafo y la corriente en el devanado del electroimán *15* (fig. 131, *a*). Observando la posición del reflejo luminoso sobre el papel, se va aumentando poco a poco la sensibilidad del vibrador, haciendo girar la manecilla *16* (fig. 131, *a*), y se lleva hasta el máximo; simultáneamente, mediante las manecillas *6* "equilibrado" (fig. 131, *b*) se compensa el puente, logrando la falta de corriente en el vibrador. Una vez que se han comprobado y equilibrado todos los canales que trabajan, se efectúa el registro del proceso. Para el propósito se pone la velocidad necesaria de movimiento del papel, y conectando el interruptor *10* (fig. 131, *a*) —con las puertecillas del oscilógrafo cerradas y conectados los interruptores *13*, *12*, *14*—, se realiza el registro necesario.

§ 10 MEDIDOR ELECTRÓNICO DE LAS DEFORMACIONES

El instrumento (fig. 132, *a*) es propio para medir con extensómetros de hilo resistente tanto las deformaciones estáticas como las que se cambian lentamente.

El esquema del puente de medición del instrumento (fig. 132, *b*) tiene en calidad de los brazos unas resistencias constantes (R_1 y R_2) montadas dentro de él, captadores activo y de compensación con las resistencias R_a y R_0 (sobre el objeto investigado).

La compensación del puente se logra trasladando el cursor *1* del reóstato *2*.

El instrumento se alimenta de la red de corriente alterna de 127—220 V con una frecuencia de 50 Hz. Al cargar un elemento ensayado de una estructura, varía la resistencia del extensómetro activo. Entre los puntos *d* y *e* nace una diferencia de potenciales que se aplica a la entrada del amplificador *3* accionando el motor *4* que por medio del reductor *5* se une con el cursor del reóstato que tiene agujas. El motor funciona y los contactos del reóstato se mueven hasta que el puente esté equilibrado. La escala del instrumento se gradúa en magnitudes de la deformación relativa. El valor de una división es de $1 \cdot 10^{-5}$.

El instrumento se destina para el trabajo con los extensómetros con una resistencia de 70 a 600 ohmios y una sensibilidad de 1,9 a 2,2. Tiene una escala con dos agujas (véase la fig. 132, *a*).

El panel delantero del instrumento lleva lo siguiente: escala con agujas de indicación; manecilla del indicador de sensibilidad de los captadores; manecilla e indicador del equilibrado de fase; interruptor; borne "tierra" y tres bornes para conectar el semipuente de medición.

Al borne *K* se le conecta el extensómetro de compensación; al borne *A*, el extensómetro activo y al borne *O*, el punto común de su unión.

El indicador de sensibilidad se pone en la posición que corresponde a la sensibilidad de los extensómetros utilizados. Luego el instrumento se conecta en la red y, una vez calentado durante 20 min, por medio de la manecilla "puesta en fase" se realiza el equilibrado de la componente reactiva de la señal de entrada que surge a causa de diferente capacidad de los conductores de conexión y los brazos del puente con respecto a la tierra. Antes de empezar la medición se fija la lectura inicial. La magnitud verdadera de la deformación es igual a la diferencia entre la lectura medida y la inicial (nula).

Si se miden las deformaciones en varios puntos, es necesario hacer uso del conmutador.

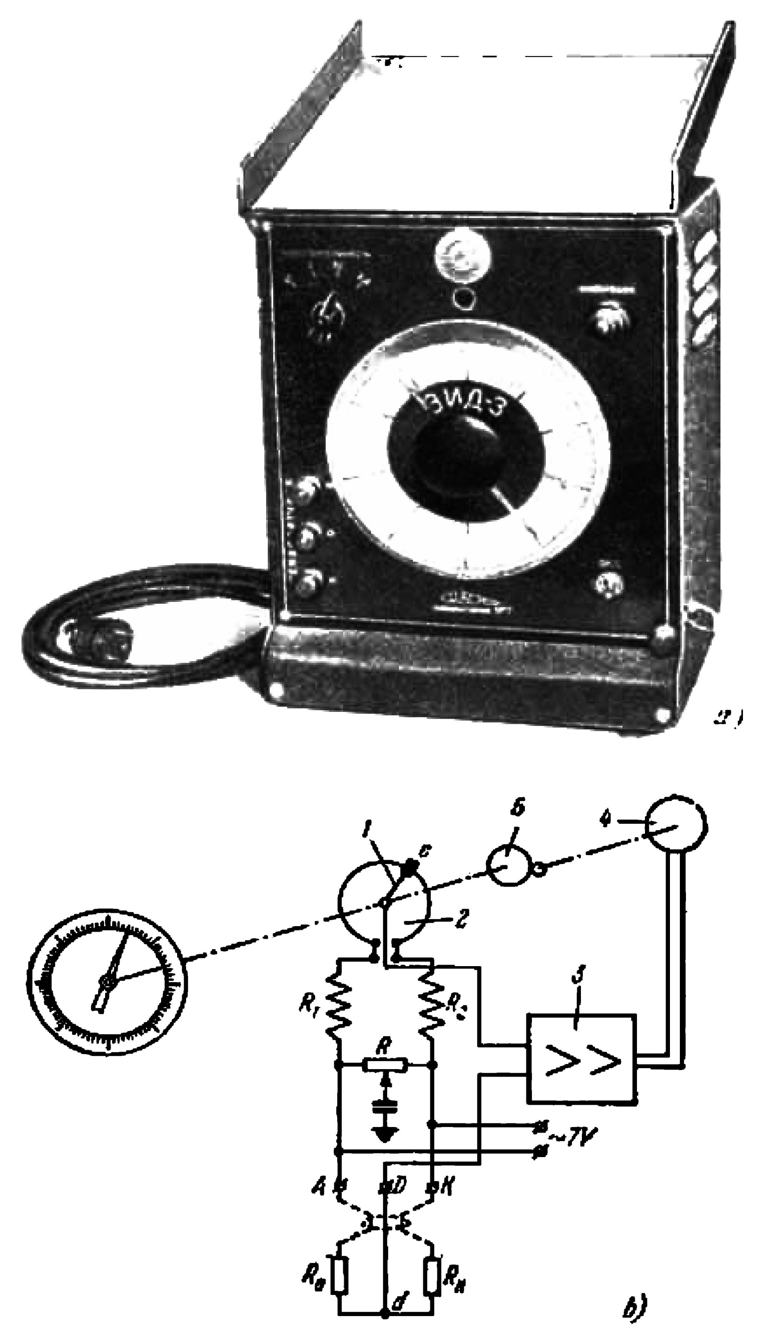


Fig. 132 *a*, medidor electrónico automático de las deformaciones; *b*, esquema principal del medidor electrónico de las deformaciones: *1*, contacto móvil; *2*, reóstato; *3*, amplificador; *4*, motor *5*, reductor.

§ 11. EQUIPO PARA MEDIR DEFORMACIONES ESTATICAS Y DINAMICAS

El equipo del tipo 8-АНЧ-7М (8-ANCh-7M) es propio para la medición en ocho puntos de las deformaciones dinámicas y estáticas que surgen en las piezas de máquinas y otras estructuras durante su trabajo.

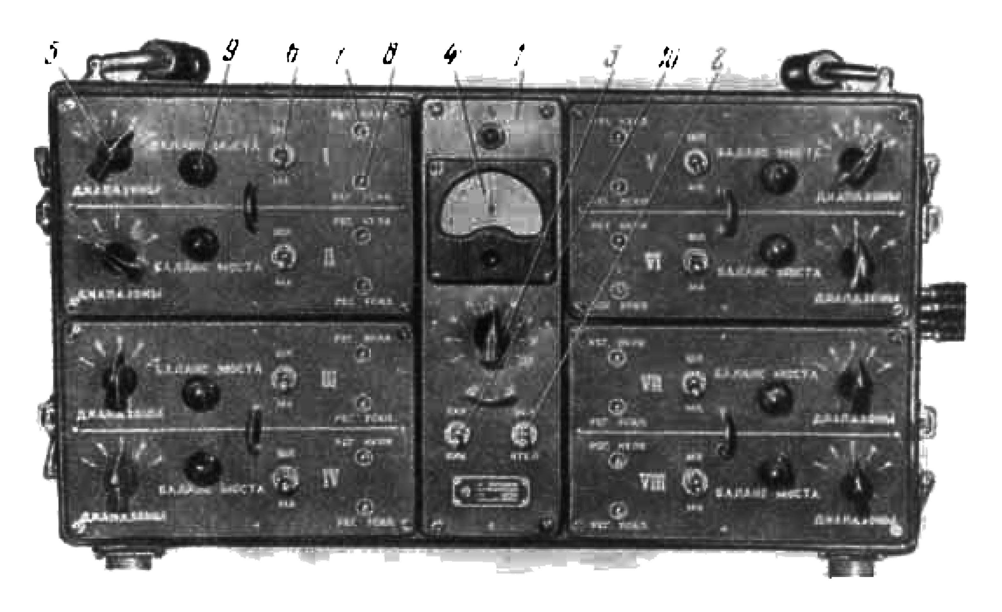


Fig. 133 | Dispositivo de amplificación: *1*, bloque del generador; *2*, interruptor de la red; *3*, conmutador de los canales; *4*, instrumento de regulación; *5*, conmutador de los diapasones; *6*, conmutador del bucle; *7*, eje del regulador de cero; *8*, eje del regulador de amplificación; *9*, manecilla de equilibrado del puente; *10*, interruptor de la calibración.

Para el registro de los procesos que transcurren con una frecuencia elevada se utilizan vibradores de bucle que tienen la frecuencia propia alta. La potencia obtenida en la diagonal de medición del puente no es suficiente para que se pueda conectar el vibrador directamente en ella. Para elevar esta potencia se necesita ya el aumento de la potencia de los captadores, ya el empleo de los amplificadores. El equipo no es sino dispositivo de amplificación que consta de ocho amplificadores del mismo tipo que se alimentan del bloque generador *1* (fig. 133) y del bloque de los rectificadores (fig. 134).

Analicemos el funcionamiento de un canal de amplificación, ya que los demás funcionan por analogía (fig. 135).

El canal funciona como sigue: el bloque de alimentación *BA* transforma la corriente alterna industrial en otras corrientes necesarias continuas y alternas y alimenta el generador de frecuencia portadora *G*, el amplificador de potencia *AP* y el amplificador de canal *A*. El semipuente *S* (dentro del instrumento) y el semipuente *D* sobre el objeto ensayado forman un puente de medición que se alimenta del generador de frecuencia portadora *G* a través

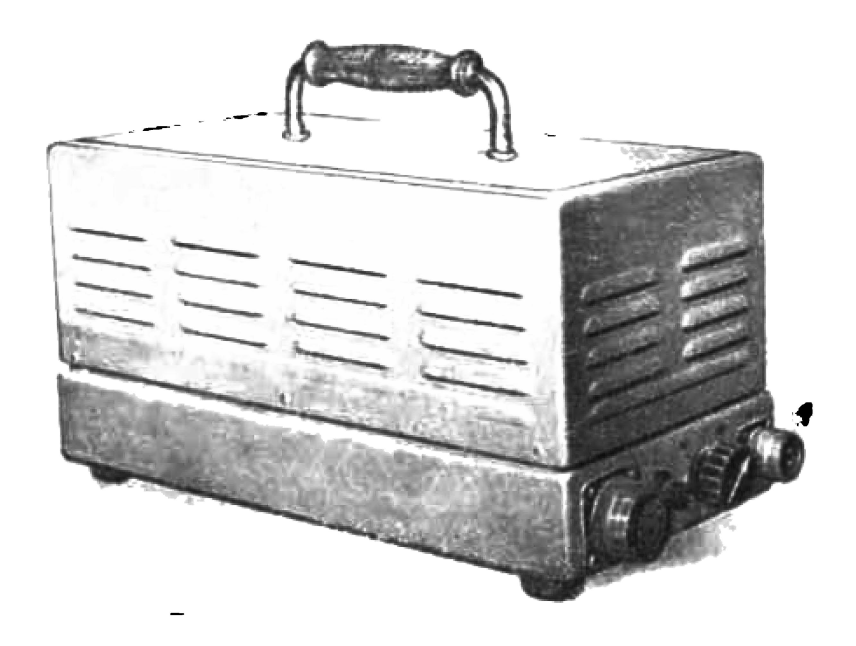


Fig. 134 | Bloque de los rectificadores.

del amplificador de potencia *AP*. A causa de la acción de las deformaciones el puente de medición pierde el equilibrio y en su diagonal aparece una corriente modulada de desequilibrio. Esta corriente se amplifica por el amplificador de canal *A* y se suministra al detector fasesensible *FD* que separa de la corriente modulada la señal modulante. Su magnitud es proporcional a la deformación medida. Las componentes de la frecuencia portadora que acompañan el proceso son detenidas por el filtro *F*. La tensión de salida obtenida después del filtro *F* se suministra al vibrador magnetoeléctrico *V* del oscilógrafo. Las tensiones de la red de alimentación son como sigue: corriente alterna de 110 y 220 V con una frecuencia de 50 Hz y 115 V con una frecuencia de 400 Hz.

El número de los procesos que se investigan simultáneamente es de 1 a 8. La banda de frecuencias que se dejan pasar por el dispositivo de amplificación es de 0 a 500 Hz.

Los captadores utilizados deben tener una resistencia de 70 a 400 ohmios. La longitud límite del cable desde el punto de la medición hasta el amplificador es de 25 m.

Para la medición de las deformaciones están previstos tres diapasones. El equipo tiene un dispositivo para crear el impulso

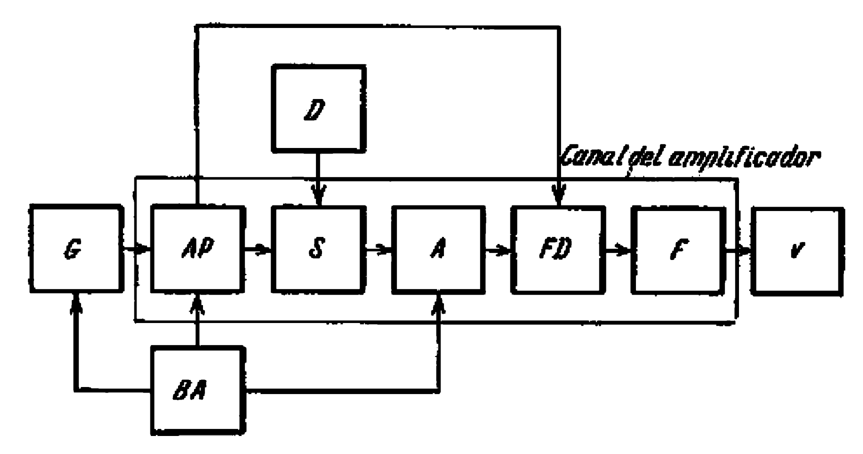


Fig. 135 | Esquema sinóptico del canal de amplificación.

de calibración. La preparación del equipo para el trabajo consiste en lo siguiente (véase la fig. 133):

1) Uniendo el equipo con el captador (por medio de cables especiales y enchufes en el dorso del dispositivo de amplificación), conectar el interruptor *2* y calentar el equipo durante 15 min.

2) Poner el conmutador de diapasones *5* en la posición 0, el conmutador *6* en la posición *MA*, el conmutador *3* en la posición que corresponde al canal regulado (frente a su número).

3) Haciendo girar el cursor de la resistencia, cuyo eje *7* sale en el panel delantero y tiene una ranura para el destornillador, regular el cero del equipo tratando de poner en cero la aguja del instrumento *4*.

4) Con el fin de comprobar el coeficiente de amplificación del equipo poner el conmutador *5* en la posición *K* (conectando la señal de calibración en la entrada del equipo) y el conmutador *3*, en la posición que corresponde al número del canal regulado. Si el instrumento *4* no marca exactamente 30 mA, hacer el reglaje de la amplificación moviendo el cursor de la resistencia, cuyo eje *8* sale en el panel delantero, mediante el destornillador.

5) Poner el conmutador *5* en la posición *3* y trasladándolo consecutivamente de la posición *3* en la posición *1* (sensibilidad máxima del canal), con un giro de la manecilla *9* realizar el equilibrado del puente de medición (mediante el instrumento *4*).

6) Poner el conmutador *6* en la posición "шл" (bucle), conectando la salida del canal al vibrador.

Así se regulan todos los ocho canales. El conmutador *5* de los canales que no trabajan debe ponerse en la posición 0.

Durante el trabajo se registran primeramente las cargas cero y luego se efectúa la inscripción de los oscilogramas, una vez aplicadas las cargas de trabajo. Para registrar la señal de calibración, el conmutador *10* se traslada en la posición "тар" (calibración), y luego de nuevo en la posición "изм" (cambio) que es la posición de trabajo del conmutador.

CAPITULO VI

Máquinas de ensayo de tornillo con palanca de medición de fuerza horizontal

§ 12. MAQUINA DE DESGARRE CON FUERZA DE HASTA 50 TF

Las máquinas de ensayo de tornillo o de husillo son difundidas ampliamente en la técnica de laboratorio. El esfuerzo que se transmite sobre la probeta ensayada se engendra en estas máquinas por medio de uno o dos tornillos.

A continuación se da la descripción de las máquinas en las cuales la fuerza excitada por un tornillo se mide merced a una palanca horizontal de brazos desiguales, como en la balanza decimal. La prensa de Gagarin, descrita en el experimento 1, es una máquina de este tipo.

En la fig. 136 puede verse el esquema de una máquina del sistema Mohr y Federgaf con fuerza de hasta 50 tf para los ensayos a tracción y compresión. El tornillo *1* de la máquina es accionado por medio de la tuerca *2* apoyada sobre unos cojinetes que le impiden desplazarse hacia arriba y abajo; la tuerca se acopla mediante la transmisión por tornillo sin fin *3* con la polea del motor o del accionamiento manual. La parte superior del tornillo tiene un agarrador *4* donde se sujeta una cabeza de la probeta *5*. La otra se traba en el agarrador superior *6* de la máquina, colgado articuladamente de la palanca *7*. Al hacer la tuerca movimiento giratorio, el tornillo *1* se desplaza avanzando hacia abajo, lo que origina la tracción de la probeta. El esfuerzo del tornillo, pasando por la probeta, se transmite al sistema de palanca del medidor de fuerza *7—10*.

Si la carga va en aumento, la palanca *7* se inclina girando sobre el apoyo *8* en el sentido de las manecillas del reloj (el apoyo *8* se sitúa con cierta excentricidad e con respecto a la línea de acción de la carga). El tirante *9* que une la palanca *7* con la inferior *10*, levanta esta última; para poner de nuevo la palanca *10* en la posición horizontal se debe desplazar algo el peso Q por la palanca hacia el extremo libre.

El aumento del brazo a del peso Q respecto al punto de apoyo de la palanca *10* es proporcional al aumento del esfuerzo que acciona sobre la probeta. La palanca *10* tiene puesta una escala de cargas, en la cual puede leerse la magnitud de la carga sobre la probeta que corresponde a la posición dada del peso móvil Q; los indicadores *11* tienen que coincidir en el momento de toma de

lectura. Según la magnitud del peso Q se hace uso de las escalas de 0 a 50 tf y de 0 a 5 tf.

Por medio de la manivela *12* unida con el tornillo *1* mediante dos piñones cónicos, se puede moverlo rápidamente a mano durante la colocación de la probeta. Una vez colocada la probeta,

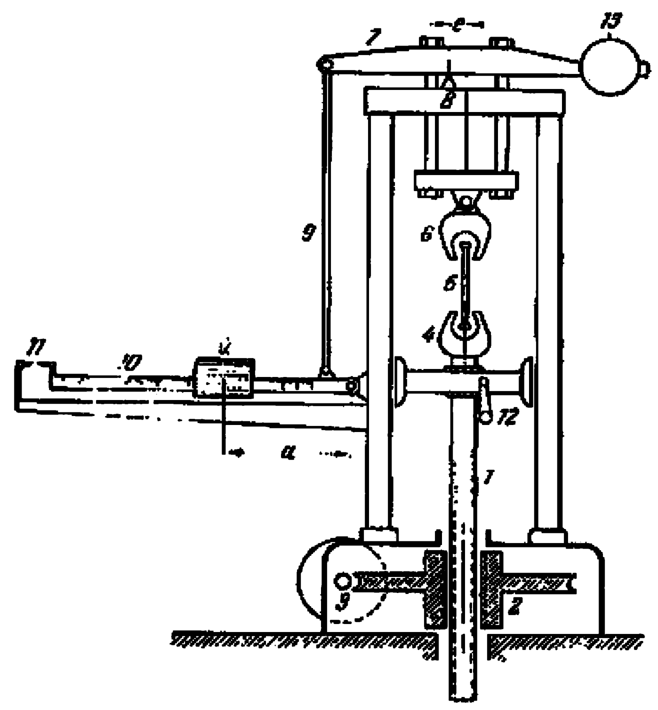


Fig 136 | Esquema de la máquina de desgarre con fuerza de hasta 50 tf: *1*, tornillo; *2*, tuerca; *3*, tornillo sin fin; *4* y *6*, agarradores de la máquina; *5*, probeta; *7*, *8*, *9*, *10*, sistema de palanca del medidor de fuerza, *11*, indicadores; *12*, manivela para poner el agarrador inferior; *13*, contrapeso; Q, peso móvil que equilibra el esfuerzo del tornillo

la manivela *12* se sujeta con un seguro. El contrapeso *13* equilibra el sistema de medición de fuerza de palanca, cuando falta la probeta o el peso Q se encuentra en la posición cero.

Al determinar el módulo de elasticidad y el límite de proporcionalidad y, en general, durante tales ensayos cuando los alargamientos de la probeta son ínfimos, su carga se efectúa a mano. Cuando los alargamientos son grandes, la carga se hace por medio del motor.

La máquina está dotada de un aparato de diagramas, por el intermedio del cual puede obtenerse en una pequeña escala el

diagrama de tracción. Las escalas del diagrama son las siguientes: por el eje de las deformaciones 2 : 1 ó 1 : 1, por el eje de las cargas 300 kgf en 1 mm ó 30 kgf en 1 mm, de acuerdo con el valor del peso Q. La máquina funciona sólo a tracción.

En la fig. 137 puede verse el aspecto general de la máquina.

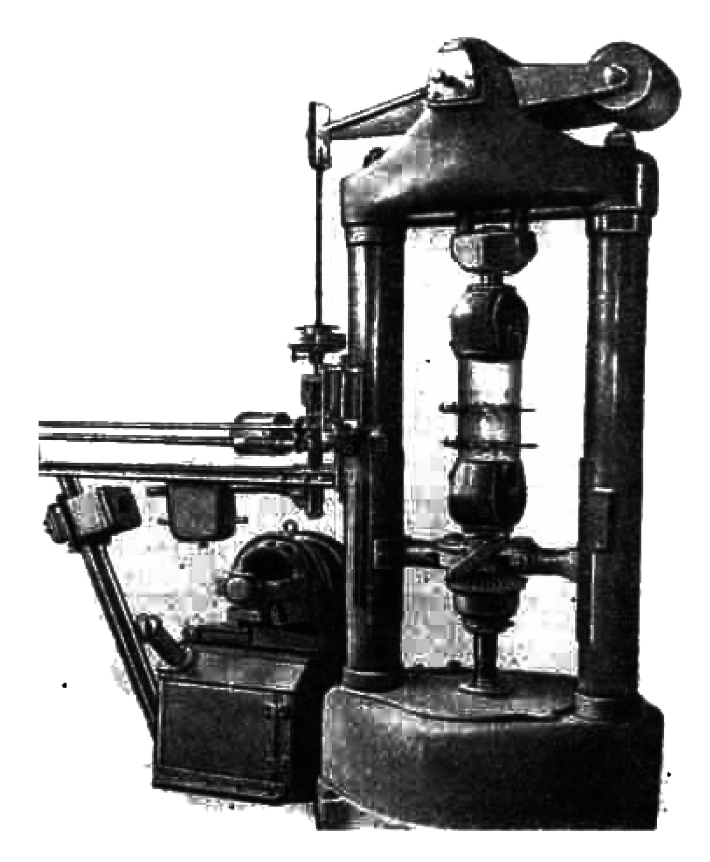


Fig. 137 | Aspecto general de la máquina para los ensayos a tracción con fuerza de hasta 50 tf.

§ 13. MAQUINA UNIVERSAL CON FUERZA DE HASTA 30 TF

La máquina universal MAN con fuerza de hasta 30 tf, mostrada en la fig. 138, tiene el excitador de fuerza mecánico y el medidor de fuerza de palanca, al igual que la máquina de desgarre con fuerza de hasta 50 tf descrita más arriba. La carga se efectúa a mano o por medio de un motor.

La manivela *1* por medio de una cadena sin fin *2* acciona el eje horizontal *3*. Este, por medio de las transmisiones por tornillo sin fin, hace girar los tornillos verticales *4* que trasladan el cabezal de trabajo *5*. La bajada del cabezal provoca la tracción de la probeta *6* que se sitúa arriba, y compresión o flexión de la probeta *7* situada abajo. En resumidas cuentas, la máquina puede

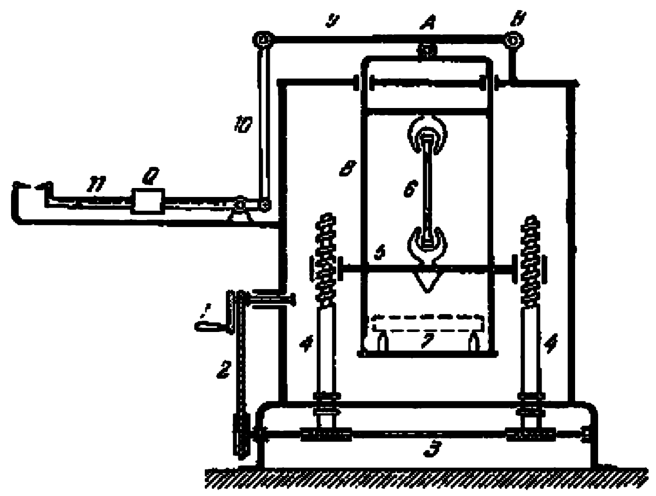


Fig. 138 | Esquema de la máquina universal con fuerza de hasta 30 tf: *1*, manivela del accionamiento; *2*, cadena sin fin; *3*, eje horizontal de la transmisión por tornillo sin fin; *4*, tornillos; *5*, cabezal; *6* y *7*, probetas ensayadas; *8*, bastidor (suspendido del punto *A*); *9*, *10*, *11*, medidor de fuerza de palanca; *Q*, peso móvil que equilibra el esfuerzo del tornillo.

utilizarse para los ensayos a tracción, compresión o flexión; precisamente por esto se llama universal. En todo caso la fuerza se transmite al bastidor *8* colgado de la palanca *9* en el punto *A* La palanca tiene un apoyo inmóvil en el punto *B*. Con otro extremo se apoya por medio de la barra *10* sobre el brazo corto de la palanca inferior *11*, teniendo en el brazo largo el peso *Q* que puede trasladarse a lo largo de ella. Si la palanca *11* ocupa una posición horizontal, el peso *Q* totalmente equilibra la fuerza que acciona sobre la probeta. Esta fuerza es proporcional al brazo de la carga sobre la palanca *11*, y su valor es indicado por la aguja sujetada al peso en una escala uniforme puesta sobre la palanca *11*. La fuerza máxima de la máquina es de 30 ó 3 tf, según la magnitud del peso *Q*; la palanca *11* tiene dos escalas correspondientes de carga

La carga de la probeta dentro de la proporcionalidad se efectúa a mano. Al alcanzar el estado de fluidez, la siguiente tracción se

hace por medio del motor. Antes de conectarlo es necesario quitar de antemano la manivela del accionamiento manual.

La máquina tiene un dispositivo para obtener diagramas de tracción o compresión. Las escalas del diagrama son las siguientes: por el eje de las deformaciones 4 : 1, por el eje de las cargas 400 kgf en 1 mm.

Para los ensayos a flexión está previsto un cabezal estacionario.

§ 14. MAQUINA DE ENSAYO A TRACCION Y COMPRESION CON FUERZA DE HASTA 3 TF

En la fig. 139 puede verse el esquema de la máquina de ensayo a tracción y compresión con fuerza de 3 tf con el medidor de fuerza de palanca.

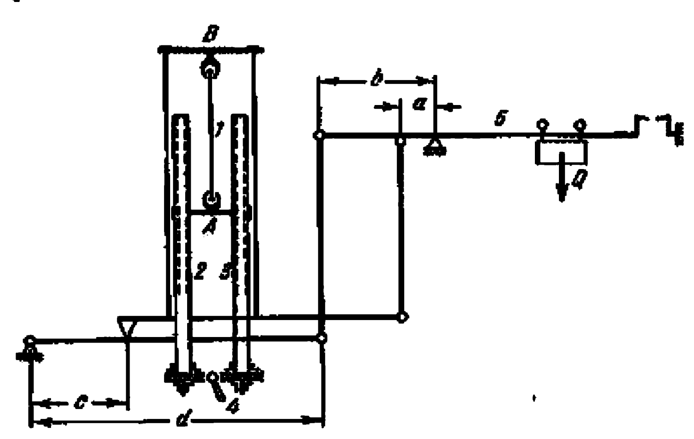


Fig. 139 | Esquema de la máquina del sistema Mohre y Federgaf para los ensayos a tracción y compresión con fuerza de hasta 3 tf: 1, probeta; *2* y *3*, tornillos; *4*, manivela del tornillo sin fin; *5*, palanca del medidor de fuerza; *Q*, peso equilibrante.

El cabezal *A* de la máquina se traslada por medio de los tornillos *2* y *3* accionados con la manivela *4* (esta parte de la máquina es semejante al dispositivo de excitación de fuerza en las máquinas descritas en los §§ 12 y 13). Durante la bajada del cabezal *A* se carga la probeta *1* que con su extremo superior se sujeta al bastidor apoyado sobre una palanca compuesta. La carga aplicada a la probeta se toma por el bastidor y se equilibra por el peso móvil *Q* situado sobre la palanca *5*. Esta tiene puesta una escala de carga de 0 a 3000 kgf cada 10 kgf. Al hacer uso del nonio, la precisión de la lectura en la escala es de 1 kgf.

La máquina puede trabajar también a compresión. Con este fin los cabezales A y B se cambian de lugar y se dotan de planchas de apoyo.

La correlación entre los brazos de las palancas de la máquina se elige de tal manera $\left(\frac{a}{b}=\frac{c}{d}\right)$ que la posición del peso Q no depende de la posición de la probeta en la plancha.

La máquina es cómoda para ensayar cilindros de paredes delgadas a compresión, porque sus planchas de apoyo tienen grandes dimensiones.

§ 15 MAQUINA DE DESGARRE CON FUERZA DE HASTA 1,5 TF

El bastidor de la máquina (fig. 140) consta del cuerpo *1* y la columna *2*. El extremo superior de la columna sirve de apoyo para la palanca *3* que porta el agarrador superior *4* de la máquina, mientras que el agarrador inferior *5* es sujetado en el tornillo tractor *6*. Las cabezas de la probeta ensayada *7* se ponen en los agarradores *4* y *5*, situando previamente el agarrador *5* a la altura necesaria por medio de la manivela *8* que acciona el tornillo *6* mediante dos piñones cónicos.

La probeta se carga mediante el accionamiento manual *9* o el motor eléctrico que hacen girar la tuerca del tornillo *6* (se encuentra dentro del cuerpo *1*). El tornillo se mueve uniformemente hacia abajo y tracciona la probeta. La fuerza de tracción se transmite a la palanca *3*, y mediante el estribo *10* se equilibra en la palanca de medición *11* por el peso móvil Q. La traslación del peso Q se efectúa por medio del volante *12* que acciona el tornillo horizontal *13* montado en la palanca de medición *11*. El giro del tornillo hace deslizar el peso Q por la palanca. Al coincidir los indicadores *14*, los valores de la fuerza que tracciona la probeta pueden leerse en la escala puesta sobre la palanca.

El aspecto general de la máquina puede verse en la fig. 141.

La máquina tiene un aparato de diagramas que permite registrar gráficamente la dependencia entre la carga sobre la probeta y su deformación. El esquema del mecanismo del aparato de diagramas se muestra en la fig. 142.

El tambor de diagramas *1* se monta sobre un eje vertical. Un hilo fino *2* atado por un extremo al agarrador móvil *4* de la máquina y portando en el otro el peso, hace una vuelta completa alrededor del cuello del tambor. Al desplazarse el agarrador *4* se mueve el tambor; el ángulo de giro del tambor es proporcional al

desplazamiento del agarrador que puede considerarse igual al alargamiento total de la probeta, porque el otro agarrador *5* prácticamente se queda inmóvil.

Sobre la superficie del tambor *1* se pone previamente un papel, en el cual, al girar el tambor, el lápiz *6* traza el diagrama. El

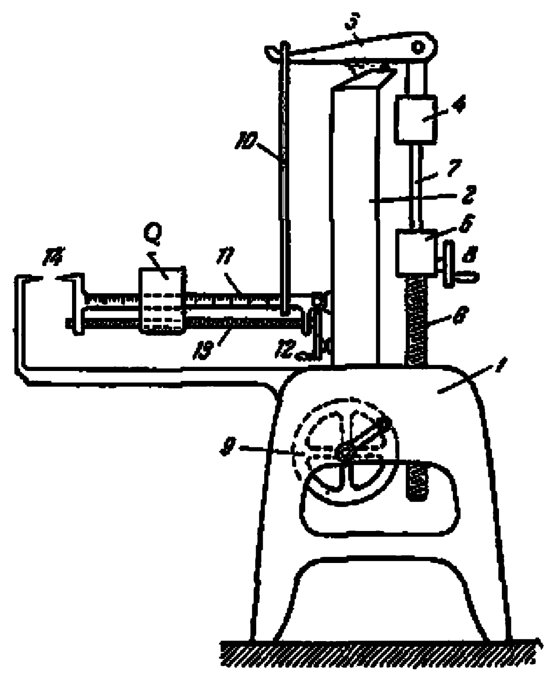


Fig. 140 | Esquema de la máquina de desgarre del sistema Mohre y Federgaf con fuerza de hasta 1,5 tf: *1* y *2*, bancada; *4* y *5*, agarradores; *6*, tornillo tractor; *7*, probeta ensayada; *8*, palanca de colocación; *3*, *10*, *11* y *14*, balanza de palanca (medidor de fuerza); *12* y *13* mecanismo de traslación del peso *Q*; *9*, palanca del accionamiento manual para cargar la probeta (se quita cuando se trabaja con motor).

lápiz se sujeta sobre una varilla vertical unida con el mecanismo de traslado del peso *Q* que equilibra la fuerza de tracción del tornillo. La varilla se desplaza por medio de la misma manivela *7* que el peso *Q*.

Así pues, por el eje de las abscisas del diagrama se coloca el alargamiento absoluto de la probeta, y por el eje de las ordenadas, la carga. La escala de los alargamientos es igual a dos, porque el diámetro del cuello del tambor es dos veces menor que el diámetro del tambor. La escala de cargas depende del valor del contrapeso *Q*. Su valor normal corresponde, encontrándose éste en la posición extrema sobre la palanca de medición, a la fuerza

máxima de la máquina, o sea, 1500 kgf. En el caso de una probeta de pequeñas dimensiones es racional sustituir el contrapeso por otro más pequeño; esta medida aumentará la precisión de la

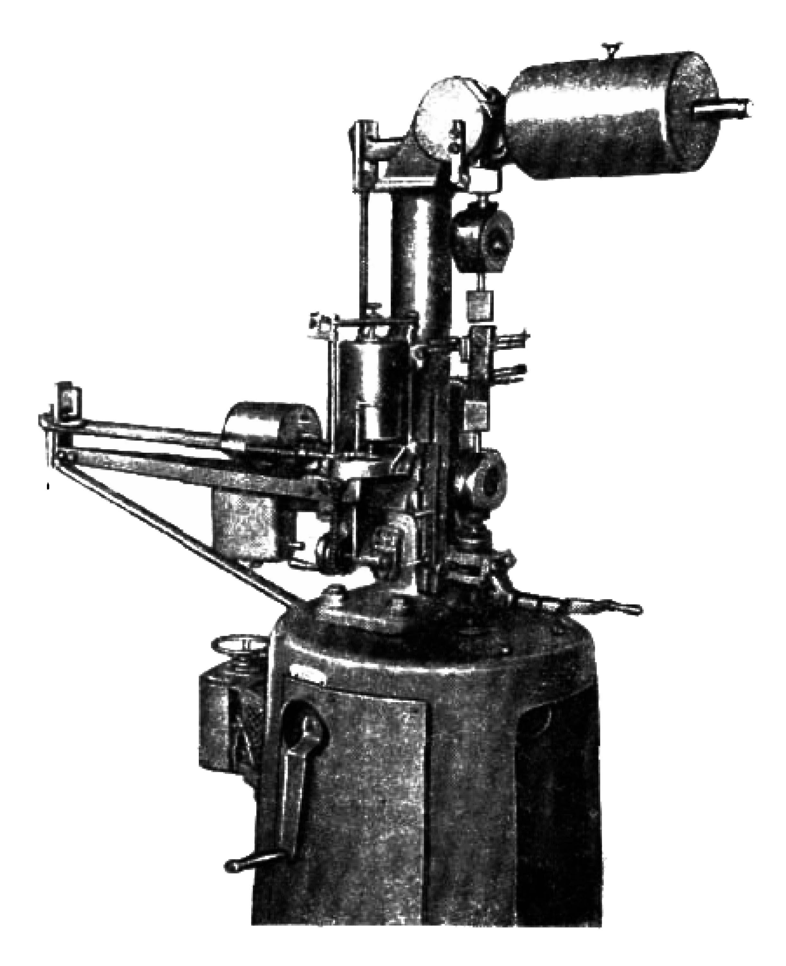


Fig. 141 | Aspecto general de la máquina para los ensayos a tracción con fuerza de 1,5 tf.

medición de la carga. El contrapeso menor corresponde en su posición extrema a una fuerza de 150 kgf. Si el contrapeso es normal, 1 cm por el eje de las ordenadas en el diagrama corresponde a 167 kgf de carga sobre la probeta.

Los ejes de coordenadas se trazan en el diagrama antes de empezar el ensayo. Para trazar el eje de las abscisas, a la probeta se aplica cierta carga, bastante pequeña, por medio del volante 9

del accionamiento manual (fig. 140), disminuyéndola luego cuidadosamente con el mismo volante hasta cero. Después se hace a mano que el tambor de diagramas haga una vuelta alrededor de su eje, mientras que el lápiz va trazando el eje de las abscisas. El de las ordenadas también se traza cuando la carga es nula, haciendo girar la manivela *12*; el lápiz ha de trazar una línea vertical que no es sino el eje de cargas.

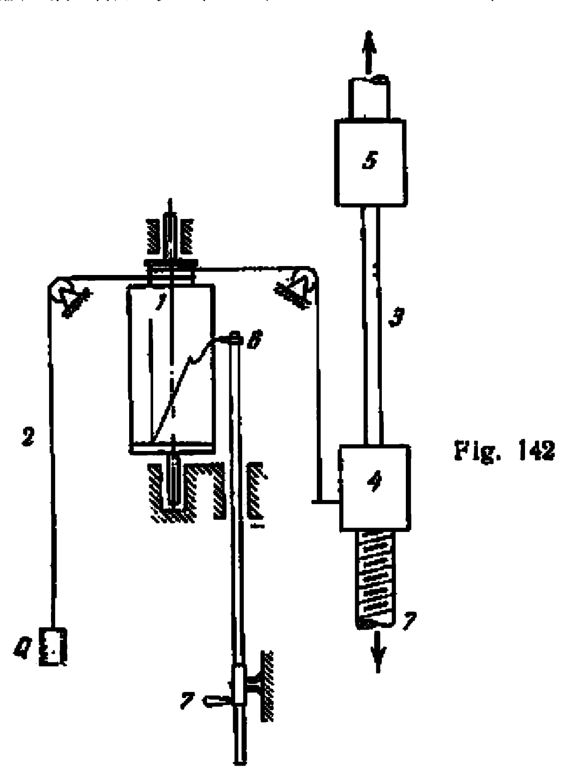


Fig. 142 | Esquema del aparato de diagramas de la máquina de desgarre con fuerza de hasta 1,5 tf: *1*, tambor de diagramas; *2*, hilo fino; *3*, probeta sometida a tracción; *4*, agarrador móvil de la máquina; *5*, agarrador inmóvil; *6*, lápiz sobre la varilla unida con el mecanismo de traslado del peso; *7*, manivela de la varilla vertical.

No se debe perder de vista que antes de poner en marcha el motor tiene que quitarse la manivela *9* del accionamiento manual.

§ 16. MAQUINA DE TORSION DE HASTA 600 KGM

En la fig. 143, *a* se da el aspecto general de la máquina de torsión del sistema Ohlson que excita un momento torsor de hasta 600 kgm. El esquema de la máquina puede verse en la fig. 143, *b*. La probeta *1* se traba en los agarradores *2* y *3*. El agarrador *2* se une a la parte de excitación de fuerza de la máquina, mientras que el agarrador *3*, a la parte de medición de fuerza. La máquina se pone en movimiento mediante un motor eléctrico o a mano. Por medio de un sistema de transmisiones por engranajes y por fricción al agarrador *2* se le comunica el movimiento giratorio alre-

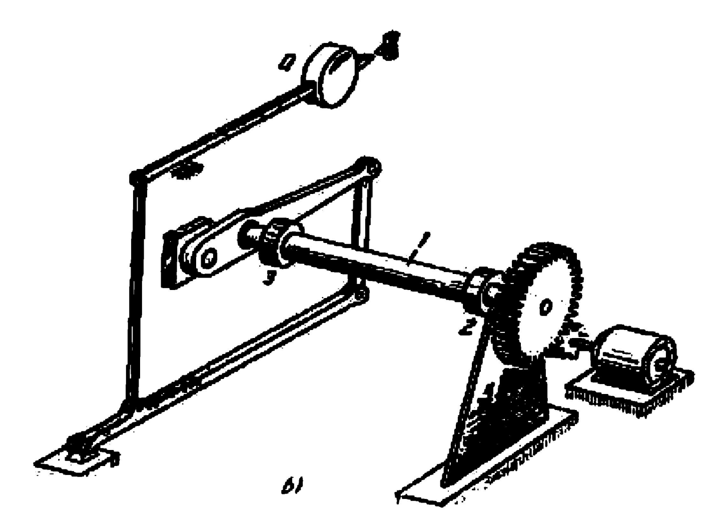


Fig. 143 | Máquina de torsión con medidor de fuerza de palanca: *a*, aspecto general de la máquina; *b*, esquema de la estructura: *1*, probeta; *2*, agarrador de la máquina empalmado con el excitador de fuerza; *3*, agarrador empalmado con el medidor de fuerza; *Q*, peso equilibrante móvil.

dedor de su eje que coincide con el eje de la probeta. De tal manera ésta se somete a torsión.

El momento torsor transmitido por medio de la probeta al agarrador *3*, se toma por un sistema de palancas donde se equilibra mediante el peso móvil *Q*.

La estructura de la máquina permite cargar la probeta a velocidad pequeña o grande. La torsión es posible solamente en el sentido de las manecillas del reloj. Si es necesario torcer la probeta en contra del sentido de las manecillas del reloj, se debe volver a la probeta el otro lado de la parte de medición de fuerza de la máquina, cambiando de lugar correspondientemente el agarrador *3*.

CAPITULO VII

Máquinas de tornillo con medidor de fuerza pendular

§ 17. MAQUINA UNIVERSAL WPM CON FUERZA DE HASTA 6 TF

Las veces del excitador de fuerza de la máquina universal WPM (R.D.A.), al igual que de las máquinas descritas en el capítulo anterior, las hace el tornillo, pero la medición de la fuerza no se efectúa por medio de la palanca simple, sino la acodada que se llama péndulo. En la actualidad las máquinas de péndulo son ampliamente difundidas. A ese tipo pertenece también la máquina ГЗИП-Р5 (GZIP-R5) descrita en el experimento 2.

La máquina del sistema WPM con fuerza de hasta 6 tf (fig. 144) es adaptada para los ensayos a tracción, compresión y flexión.

El esquema de la máquina puede verse en la fig. 145. El árbol horizontal *1* es accionado a mano o por medio de un motor. Mediante una transmisión por tornillo sin fin el árbol hace girar dos tornillos verticales de la máquina que trasladan el cabezal *2*. La traslación de éste hacia abajo provoca tracción de la probeta *3* colocada en los agarradores de la máquina. El esfuerzo de la probeta se transmite a la palanca acodada (péndulo) que porta el peso *4* y origina la desviación del péndulo (se muestra con la línea punteada). La desviación del péndulo es proporcional al esfuerzo que actúa sobre la probeta. La cremallera *5*, unida al péndulo, indica este esfuerzo en el tambor de diagramas *6*, trazando con la pluma *7* en la superficie del tambor una línea a lo largo de la generatriz en escala 500 ó 83 kgf en 1 cm (según el valor del peso *4*). En la fig. 145 se muestra con la línea punteada la posición de la pluma *7* que corresponde al péndulo trasladado. El desplazamiento de la cremallera *5* provoca un giro de la aguja que muestra en la escala *8* el esfuerzo de la máquina.

El alargamiento de la probeta se fija en el tambor de diagramas *6* por medio del hilo *9*. Este se ata con uno de sus extremos al agarrador superior de la máquina, luego pasa alrededor de una polea sujetada al cabezal *2*, y mediante dos poleas más sigue hasta el cuello del tambor, abrazándolo con una vuelta completa, y se termina con un peso *10*. Un levantamiento o una bajada de dicho peso corresponde al cambio de la distancia entre el agarrador superior de la máquina y el cabezal, haciendo girar el tambor; la pluma *7* traza en la circunferencia del tambor una línea, cuya lon-

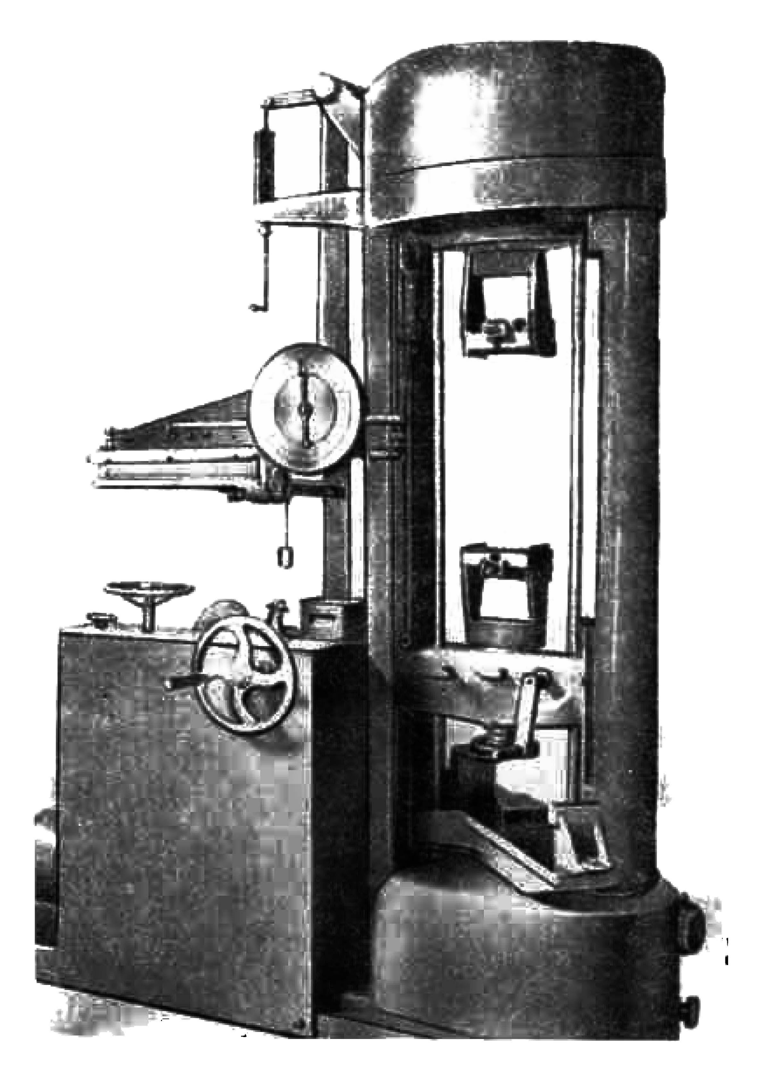


Fig. 144 | Aspecto general de la máquina universal WPM de hasta 6 tf.

gitud supera 4 veces el susodicho cambio de la distancia entre los agarradores de la máquina que es igual al alargamiento de la probeta [1]). Simultáneamente se inclina el péndulo, por eso en el tambor se reflejará la dependencia entre la carga y la deformación, es decir, el diagrama de tracción descrito en el experimento 1.

---

[1]) Se puede fijar también otra escala de las deformaciones, a saber: 2 : 1, 5 : 1 ó 10 : 1.

También se mide la magnitud real del alargamiento de la probeta como el desplazamiento del cabezal con respecto al bastidor *11* que tiene puesta una escala milimetrada.

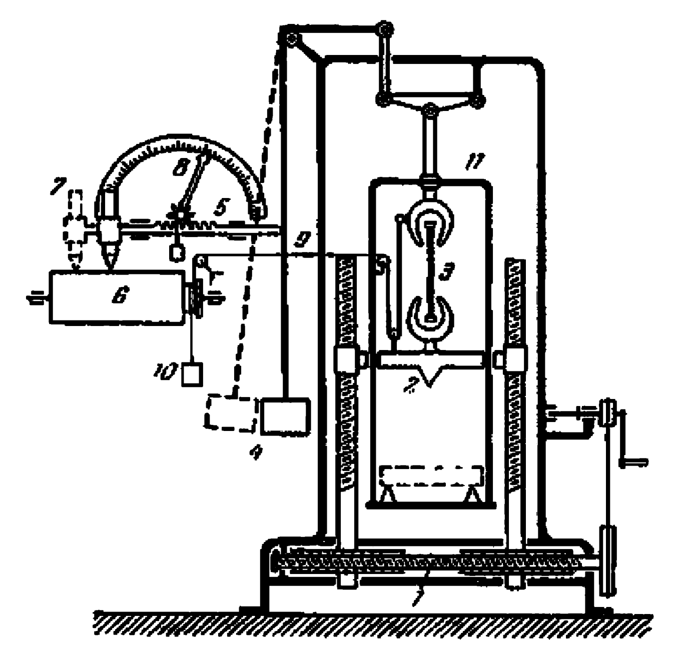


Fig. 145 | Esquema de la máquina universal WPM con fuerza de hasta 6 tf: *1*, tornillo sin fin; *2*, cabezal; *3*, probeta; *4*, péndulo con peso; *5*, cremallera-corredera; *6*, tambor de diagramas; *7*, pluma; *8*, escala del medidor de fuerza; *9*, hilo; *10*, peso que tensa el hilo; *11*, bastidor para el ensayo a flexión y compresión.

Durante los ensayos a tracción y flexión las probetas se sitúan en la parte inferior del bastidor, como se muestra en la fig. 145 con la línea punteada.

§ 18. MAQUINAS DE DESGARRE ИМ-12А

La máquina de desgarre ИМ-12А (IM-12A)[1]) con fuerza de 12 tf (fig. 146) es propia para los ensayos estáticos de probetas cilíndricas y planas a tracción. Haciendo uso de unos dispositivos especiales se puede realizar en esta máquina los ensayos a compresión y cizallamiento.

---

1) La máquina es diseñada en el Instituto central de investigación científica de maquinaria pesada (por I V. Kudriavtsev y M I. Chuloshnicov).

El esquema de la máquina puede verse en la fig. 147. El mecanismo de carga consta de un tornillo tractor *1*, una tuerca dentada *2* y un tornillo sin fin *3*. Este mecanismo está situado dentro

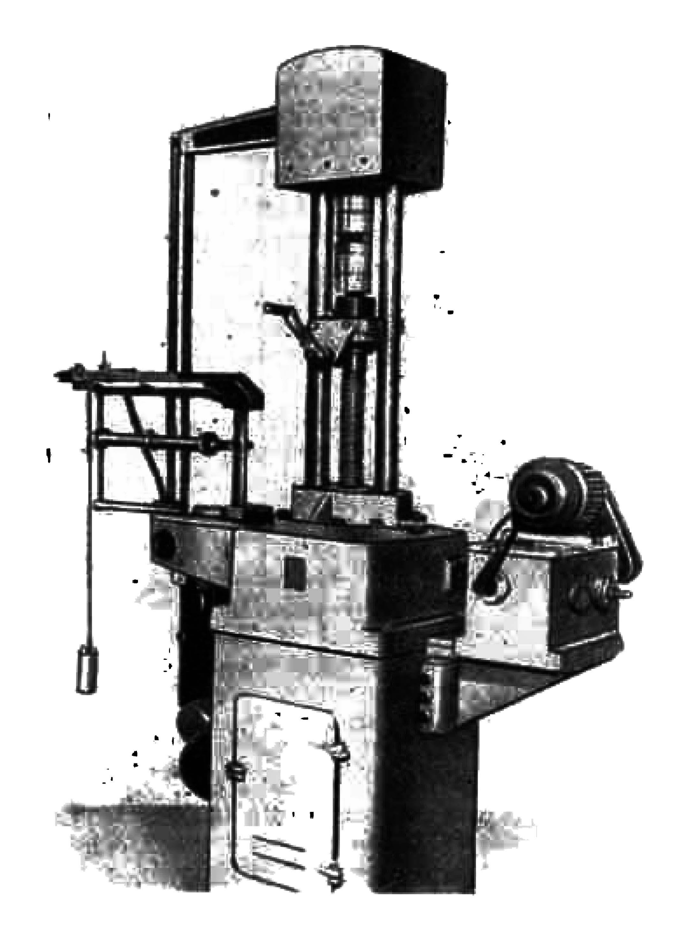


Fig. 146 | Aspecto general de la máquina ИМ-12A (IM-12A) para los ensayos a tracción.

de la bancada de la máquina. El tornillo sin fin se empalma por un extremo con el árbol del reductor por medio de un acoplamiento de platillos. El movimiento giratorio del tornillo sin fin origina el giro de la tuerca y el movimiento de avance del tornillo, cuyo extremo superior tiene el agarrador *4* para sujetar la probeta ensayada *5*. La tuerca se apoya sobre la tapa de la bancada por medio de un cojinete *6*.

La parte de medición de fuerza de la máquina ИМ-12A está dotada de un sistema de palancas, a saber: la palanca 7 de primer género con una relación de los brazos $a : b = 1 : 60$, y una palanca acodada con el contrapeso Q llamada péndulo. El agarrador superior de la máquina cuelga del brazo corto de la palanca 7. El

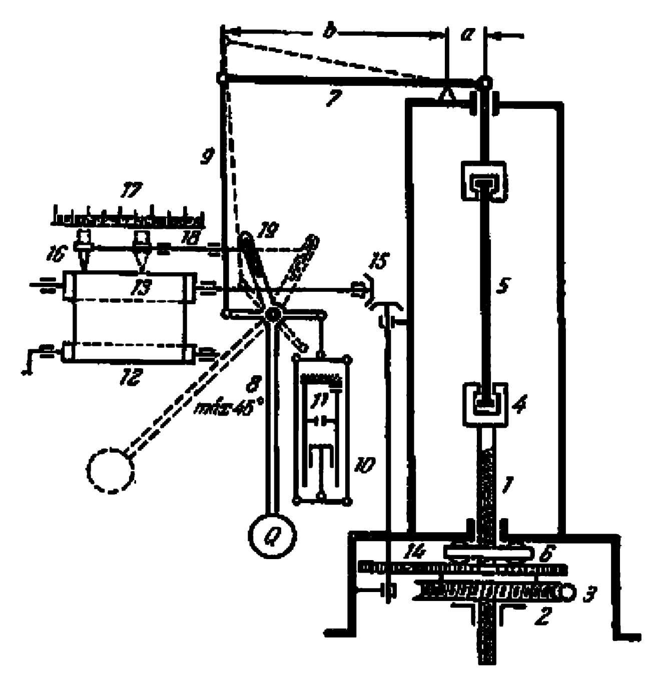


Fig. 147 | Esquema de la máquina de desgarre ИМ-12A (IM-12A): *1*, tornillo; *2*, tuerca dentada; *3*, tornillo sin fin; *4*, agarrador inferior de la máquina; *5*, probeta; *6*, cojinete; *7*, palanca del medidor de fuerza; *8*, péndulo; *9*, tirante; *10*, freno; *11*, cilindro del freno; *12*, rodillo para arrollar papel; *13*, tambor de diagramas; *14* y *15*, transmisión por engranaje del tambor; *16*, pluma; *17*, escala del medidor de fuerza; *18*, corredera; *19*, perro de arrastre de la corredera.

esfuerzo del tornillo tractor *1*, transmitido sobre la palanca mediante la probeta *5*, provoca el giro de dicha palanca (se muestra con la línea punteada). El brazo largo de la palanca *7* se acopla articuladamente con la manivela del péndulo mediante el tirante *9* y provoca, por consiguiente, la desviación del péndulo. Cuanto más grande sea el esfuerzo que actúa sobre la probeta, tanto mayor será la desviación. Los valores de los esfuerzos que corresponden a la desviación del péndulo se marcan en la escala *17* del medidor de fuerza. La magnitud del esfuerzo se fija por medio de un indicador ubicado en la corredera *18* que se traslada horizontal-

mente accionada por el perro de arrastre *19* con una ranura sujetado rígidamente en el péndulo *8*.

El freno hidráulico automático garantiza una bajada suave del péndulo después de la destrucción de la probeta. Al bajar el péndulo, el émbolo del freno *10* se levanta hacia arriba, exprimiendo el aceite de la parte inferior del cilindro *11* a la superior. La velocidad de este proceso puede regularse variando la abertura que comunica ambas partes del cilindro. Con el fin de disminuir la fricción, el cilindro del freno se mantiene en continuo movimiento giratorio por medio de un motor eléctrico especial.

La máquina posee un aparato de diagramas semejante al de la prensa de Gagarin que registra automáticamente sobre papel en escala grande el diagrama de tracción. El papel se enrolla previamente en el rodillo *12*, y el extremo libre de la hoja se fija en la superficie del tambor motriz *13*. Este, durante el trabajo de la máquina, gira alrededor de su eje gracias a un sistema de engranajes cilíndricos *14* y cónicos *15*. El ángulo de giro del tambor es proporcional al ángulo de giro de la tuerca *2* y, por consiguiente, al desplazamiento del tornillo *1*; éste puede considerarse aproximadamente igual al alargamiento de la probeta. En fin, la pluma *16* sujetada en la corredera *18*, fija en la circunferencia del tambor de diagramas *13* los alargamientos de la probeta; la escala del imagen de los alargamientos depende de la relación de las dimensiones del tambor y de los engranajes *14* y *15* y es elegida igual a 100 : 1.

La pluma *16* con la corredera se mueve simultáneamente a lo largo del eje del tambor, como se mencionó anteriormente, mas este desplazamiento es proporcional a la carga. En consecuencia, obtenemos sobre el papel una curva que representa el diagrama de alargamientos buscado, es decir, la dependencia entre el alargamiento de la probeta y la carga.

El aparato de diagramas no sólo fija el alargamiento de la probeta, sino la deformación de las partes cargadas de la máquina al igual que la traslación del agarrador superior de la máquina por efecto del giro de la palanca *7*. Por eso, para determinar el alargamiento de la probeta se debe restar del alargamiento obtenido en el diagrama el resultado de influencia de los factores señalados, haciendo uso del diagrama de calibración de la máquina efectuada sobre una probeta corta y maciza, de cuya deformación se puede prescindir.

La distancia máxima entre los agarradores de la máquina es igual a 348 mm. La distancia libre entre las columnas de la bancada es de 165 mm. La salida máxima del tornillo motriz fuera de la tuerca es de 300 mm.

La probeta se carga por medio de un motor eléctrico (potencia de 0,7 kW, dando 1400 revoluciones por minuto) por el inter-

medio de un reductor. Este permite cambiar la velocidad de carga. La velocidad normal corresponde a un alargamiento de la probeta de 2 mm por minuto. Si la velocidad es grande, el alargamiento es de 16 mm por minuto.

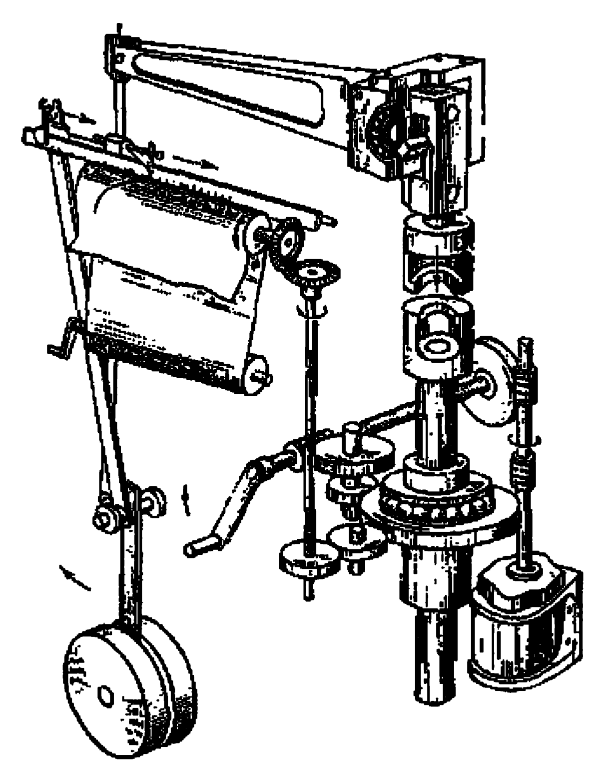


Fig. 148 | Perspectiva del esquema de correlación de las partes móviles de la máquina (véase la fig. 147).

El cambio de la dirección del movimiento del tornillo se efectúa mediante la reversión del motor eléctrico.

Existe una máquina con fuerza de hasta 4 tf, análoga a la descrita.

En la fig. 148 puede verse en perspectiva la correlación de las partes móviles de la máquina.

§ 19. MAQUINA DE TORSION DE HASTA 30 KGM

El aspecto general de la máquina se muestra en la fig. 149, y el esquema se da en la fig. 150. La probeta se fija inmóvilmente en los agarradores *1* y *2*. Un sistema de engranajes unido con el agarrador *2* se acciona mediante la manivela *4*. Para el trabajo con una velocidad menor sirve un tornillo sin fin, sobre el cual

se pone en este caso la manivela 4. Durante el giro del agarrador 2 se tuerce la probeta 3; el momento torsional se equilibra por el contrapeso pendular Q. Por la desviación del péndulo puede de-

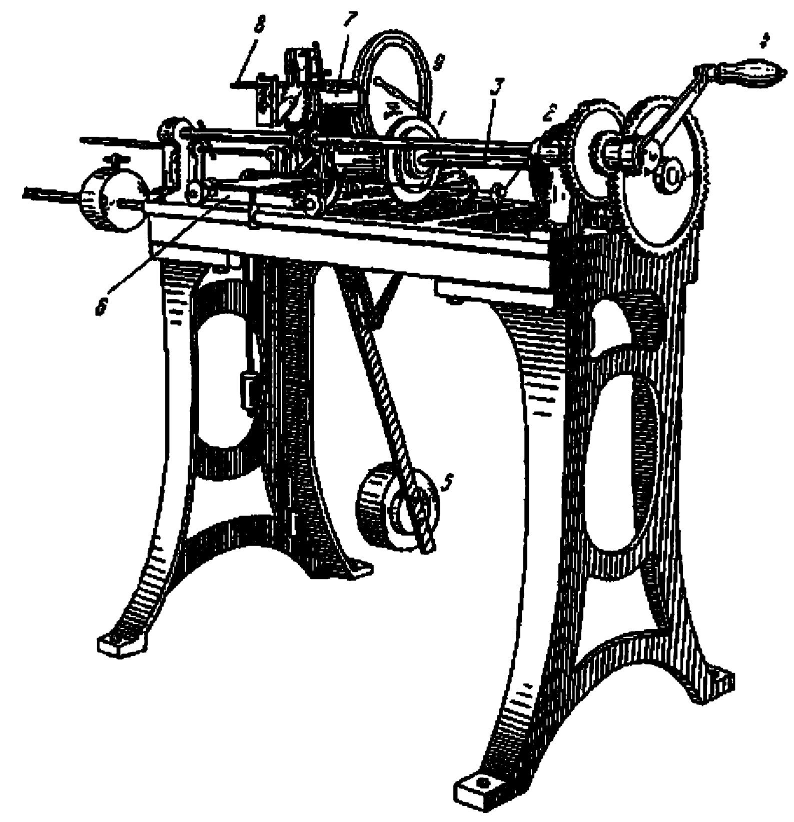


Fig. 149 | Aspecto general de la máquina de torsión con medidor de fuerza pendular (6, carro que porta el agarrador 1 con péndulo; las demás denominaciones pueden verse en la fig. 150).

terminarse el momento torsional que actúa sobre la probeta, siendo igual a Qa, donde a es la desviación del contrapeso por la horizontal con respecto a la posición inicial (fig. 150, *a*).

Los valores del momento torsional son marcados en una escala circular 9 por la aguja accionada por el péndulo durante su movimiento por medio de la corredera 8, y se registran automáticamente en el tambor de diagramas 7, porque la corredera tiene un lápiz que se apoya sobre el tambor. Así, pues, en el tambor se fijan en cierta escala los valores del momento torsional a lo largo de la generatriz del cilindro. Los valores del ángulo de giro de la probeta se marcan en el tambor a lo largo del desa-

rrollo por el mismo lápiz gracias al giro del tambor alrededor de su eje. El giro del tambor de diagramas 7 se efectúa mediante la transmisión del agarrador 2 de la máquina (la transmisión puede verse en la fig. 149), por eso el ángulo de giro del tambor es proporcional al ángulo de giro del agarrador 2. En consecuencia, en el tambor se obtiene una curva del momento torsional en función del ángulo de giro del agarrador 2. Las escalas del diagrama, cuando el peso del péndulo es máximo, son las siguien-

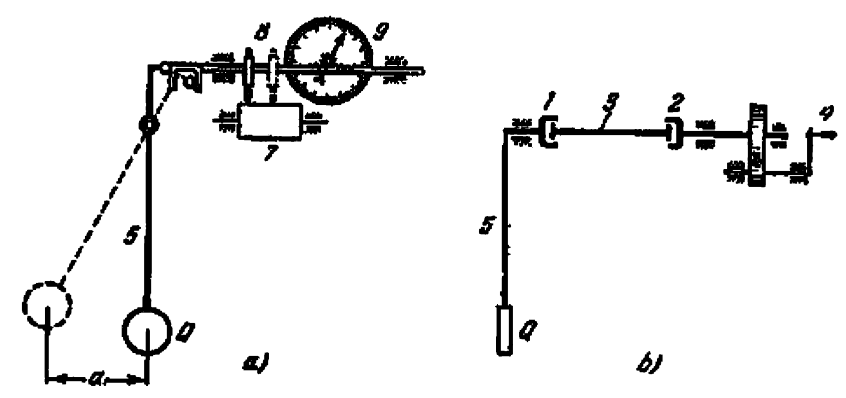


Fig. 150 | Esquema de la máquina de torsión con medidor de fuerza pendular: *a*, elevación; *b*, vista lateral; *1* y *2*, agarradores: *3*, probeta; *4*, manivela del medidor de fuerza; *5*, péndulo-medidor de fuerza; *6*, carro (véase la fig. 149); *7*, tambor de diagramas; *8*, corredera; *9*, escala del medidor de fuerza.

tes: por el eje de los momentos 300 kgf cm en 1 cm, por el eje de los ángulos 1 radián en 1 cm del diagrama. Cuando sobre el péndulo se aplica la mitad del peso (sin dos pesas complementarias), la escala de cargas del diagrama es dos veces mayor, es decir, 150 kgf cm en 1 cm.

El ángulo de giro del agarrador 2 puede observarse, aparte del diagrama, en dos escalas circulares accionadas por la misma transmisión del tambor de diagramas 7. Una escala se da en grados, la otra, en vueltas completas del agarrador (en la fig. 150 las escalas no se muestran).

Como el agarrador 1 de la máquina también gira a un ángulo igual al ángulo de desviación del péndulo, para determinar el ángulo de giro de la probeta se debe restar del ángulo mostrado en el tambor (o en la escala) el ángulo de desviación del péndulo. Para la medición del ángulo de giro del péndulo, el eje del último tiene una escala de grados.

Las máquinas existentes del tipo descrito dan un momento torsional de hasta 3, 6 y 30 kgm.

CAPÍTULO VIII

Máquinas hidráulicas

§ 20. MAQUINA UNIVERSAL CON FUERZA DE HASTA 10 TF

En la mayoría de las máquinas modernas de ensayo las veces del excitador de fuerza las hace un cilindro donde bajo presión se inyecta aceite. Una de estas máquinas; la prensa de Amsler con fuerza de hasta 200 tf, se describe en el experimento 3. El capítulo presente abarca algunas máquinas e instalaciones hidráulicas típicas para los ensayos estáticos.

El aspecto general y el esquema de la máquina universal del sistema Mohre y Federgaf con fuerza de hasta 10 tf pueden verse en las fig. 151 y 152 respectivamente.

El cabezal superior de apoyo *1* de la máquina es inmóvil. La parte móvil sujetada en el émbolo *2* del cilindro hidráulico *3*, no es sino un bastidor *4* que abraza el cabezal de apoyo *1* por arriba y por abajo. Así, pues, el levantamiento del émbolo puede ocasionar compresión (flexión) o tracción de la probeta de acuerdo con su situación. Es por eso que la máquina se llama universal.

La carga transmitida sobre el cabezal se toma por un sistema de palancas, mostrado en la fig. 152, y se equilibra por un contrapeso pendular *Q*. La desviación máxima del péndulo corresponde a una carga de 2, 5 ó 10 tf sobre la probeta, según el valor del contrapeso.

La máquina tiene un aparato de diagramas (en la fig. 152 no se muestra), cuya escala de cargas es igual a 20, 50 ó 100 kgf en 1 mm respectivamente; la escala de deformaciones puede ponerse en 4 : 1, 2 : 1 ó 1 : 1.

Durante el trabajo con la máquina hidráulica universal hay que tener presente que, situando al principio del experimento el émbolo *2* cerca del cabezal de apoyo *1* mediante una bomba, se debe disminuir el suministro de aceite hasta el momento de contacto de la probeta con el cabezal para no provocar un choque hidráulico que amenaza hacer daño al sistema hidráulico.

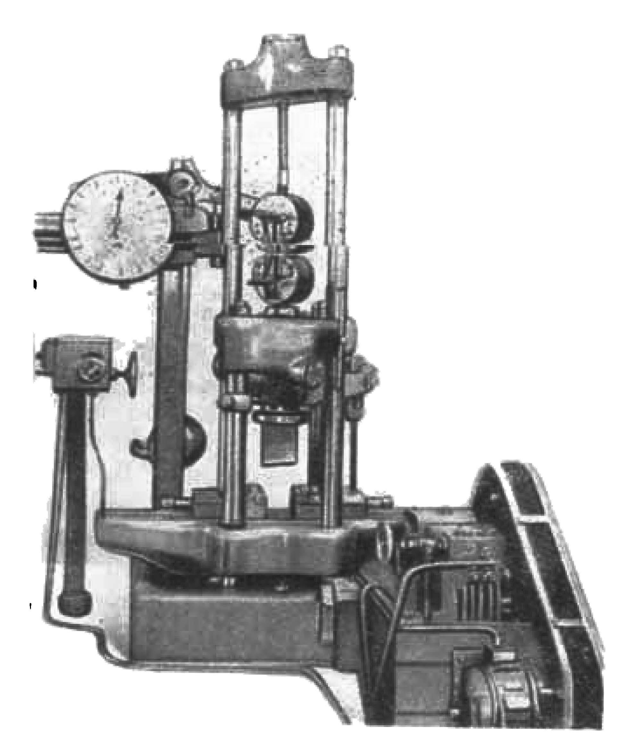


Fig. 151 | Aspecto general de la máquina hidráulica para los ensayos a tracción, compresión y flexión con fuerza de hasta 10 tf.

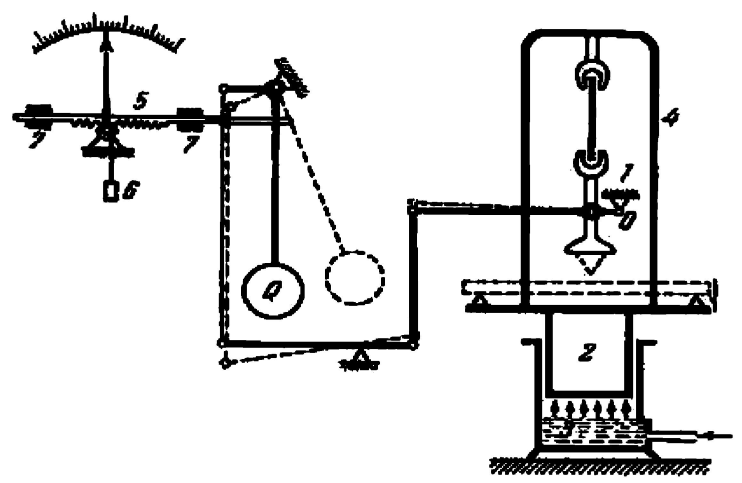


Fig. 152 | Esquema de la máquina hidráulica universal con fuerza de 10 tf: *1*, cabezal inmóvil de apoyo; *2*, émbolo; *3*, cilindro hidráulico; *4*, bastidor rígido; *5*, corredera; *6*, peso que atrae la corredera a la varilla del péndulo; *7*, rodillos.

§ 21. MAQUINA UNIVERSAL CON FUERZA DE HASTA 20 TF PARA PROBETAS LARGAS

La máquina universal en cuestión es propia para ensayar probetas largas a compresión y tracción. La máquina está dotada de una mesa para los ensayos a flexión y un dispositivo para ensayar cables a rotura. Las probetas ensayadas a compresión pueden alcanzar unos 305 cm de longitud, ensayadas a tracción, 135 cm y 185 cm con un dispositivo complementario; la longitud de las probetas ensayadas a flexión puede alcanzar unos 110 cm. La longitud máxima total de la máquina es de 635 cm.

La máquina (fig. 153) se instala sobre un cimiento al nivel del piso, empotrando la traviesa superior inmóvil *16*, unida con las columnas *12*, en un muro mediante unos soportes. Dentro de la bancada *8* se traslada por la vertical, por medio de una manivela, el husillo *9*, al cual se sujeta el agarrador inferior. El agarrador superior se atornilla por abajo al cabezal móvil *13*. Este a la vez sirve de mesa para las probetas ensayadas a flexión y de apoyo inferior para probetas comprimidas. Por medio de los tirantes *14* que tienen rosca en su parte superior el cabezal *13* se cuelga del cabezal *18*, formando un bastidor móvil de fuerza que se apoya contra el émbolo del cilindro motor *17*. Al inyectar aceite en el cilindro motor, su émbolo levanta ese bastidor ocasionando tracción de la probeta sujetada en el espacio de ensayo inferior, y compresión o flexión en el espacio de ensayo superior.

La traviesa *15* (sujetada inmóvilmente a uno de los cinco niveles que se fijan mediante las ranuras en las columnas *12*) sirve de apoyo superior para probetas comprimidas; el nivel superior se fija mediante la traviesa *16*. Para poder mover con facilidad la traviesa *15* a lo largo de las columnas *12*, ésta se equilibra por medio de dos pesos colgados de los cables que pasan por las poleas de la traviesa *16*.

Para levantar el cabezal móvil *13*, cuando se pone la distancia necesaria entre los agarradores o apoyos de las probetas comprimidas, sirve una transmisión por tornillo sin fin en el cabezal *18* accionada por medio de la cadena sin fin *19*. La altura del levantamiento del cabezal *13* o la distancia entre los agarradores inferiores está limitada por la longitud de la parte enroscada de los tirantes *14* y no sobrepasa de 135 cm. Si hay necesidad, esta distancia puede aumentarse, prolongando los tirantes *14*, poniendo sobre ellos tubos y apretándolos con tuercas debajo del cabezal *13*.

La presión de aceite en el cilindro motor *17* se crea mediante una bomba de excéntrica *1* con dos chupones, armada sobre el montante de fundición que se instala en el piso al lado de la máquina y se fija con pernos. Las fluctuaciones de la presión durante el movimiento de los chupones se rectifican por un regulador de

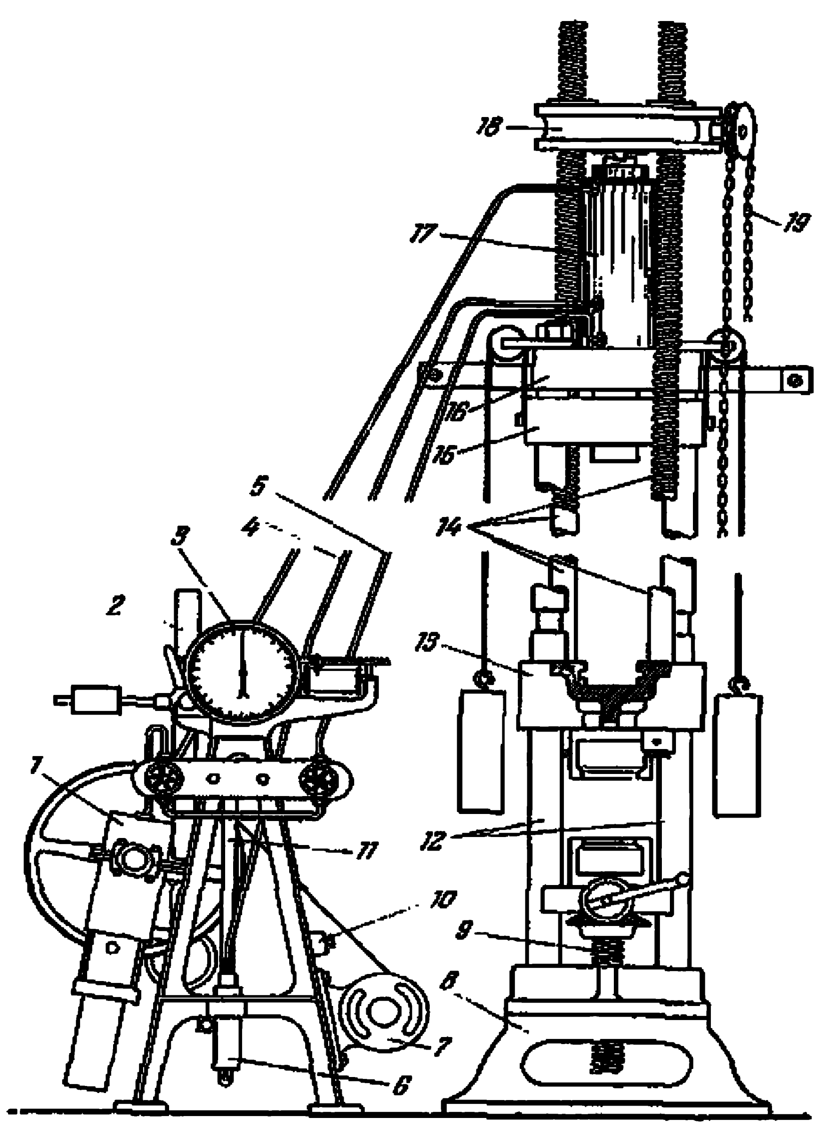


Fig. 153 | Máquina universal con fuerza de hasta 20 tf para probetas largas: *1*, bomba; *2*, péndulo; *3*, esfera del manómetro; *4*, tubería que va del cilindro motor al manómetro; *5*, tubería de la bomba al cilindro motor; *6*, pequeño cilindro del manómetro; *7*, motor eléctrico; *8*, bancada de la máquina; *9*, husillo; *10*, interruptor; *11*, tirante del medidor de fuerza; *12*, columnas; *13*, cabezal móvil; *14*, tirantes; *15*, traviesa de cambio; *16*, traviesa inmóvil; *17*, cilindro motor; *18*, cabezal; *19*, cadena sin fin.

alimentación de aceite, trabajando por eso la bomba sin golpes. El cárter de la bomba forma parte además del tanque de aceite, teniendo por ello el mecanismo buena lubricación.

La bomba es accionada, por el intermedio de una transmisión por correa, mediante el motor eléctrico *7* situado a la derecha sobre el montante. También el accionamiento manual es posible por medio de una manivela que se pone directamente sobre el eje de la bomba. Sobre el motor eléctrico se sitúa su interruptor *10*.

La bomba suministra aceite por la tubería *5* al cilindro motor *17* de la máquina comunicado por medio de la tubería *4* con el pequeño cilindro vertical *6* del manómetro. El émbolo del pequeño cilindro actúa sobre el tirante *11* y desvía el péndulo *2* del manómetro. La palanca corta del péndulo desplaza una cremallera detrás de la esfera *3* del manómetro y hace girar su aguja. El manómetro se dota de un aparato de diagramas.

El montante con la bomba y el manómetro pendular forman un grupo independiente que puede conectarse, si se desea, a otra máquina de ensayo.

§ 22. MAQUINA UNIVERSAL DE 30 TF PARA ENSAYOS CON CARGAS COMBINADAS

Examinemos la estructura de una máquina universal para el ensayo de las probetas en las condiciones de estado de tensión compuesto que se crea por una acción combinada de tracción o compresión junto con torsión y tensión interna. La carga límite de tracción o compresión es de 30 tf, de torsión, 200 kgm y de tensión interna, 300 kgf/cm². La estructura de la máquina permite crear cada género de carga por separado y en cualquier combinación con otras, siendo independiente la medición de las cargas en todo caso.

Las partes principales de la máquina son las siguientes (fig. 154):

bancada con dispositivos de apriete, cilindro para transmitir el esfuerzo longitudinal, dispositivo para la torsión de las probetas y manómetros de émbolo para medir el momento torsional;

excitadores hidráulicos de fuerza de compresión o tracción y de tensión interna con bombas, motores, compresor, balones para aire comprimido, dispositivos de arranque y regulación;

tablero de manómetros con tuberías de aceite e interruptores para la medición independiente del momento torsional y la tensión interna en las probetas huecas al igual que la presión en los balones para aire comprimido; también pertenecen manómetros de diagramas para registrar las curvas de tensión interna en la probeta (en función del tiempo) y del ángulo de torsión (en función del esfuerzo);

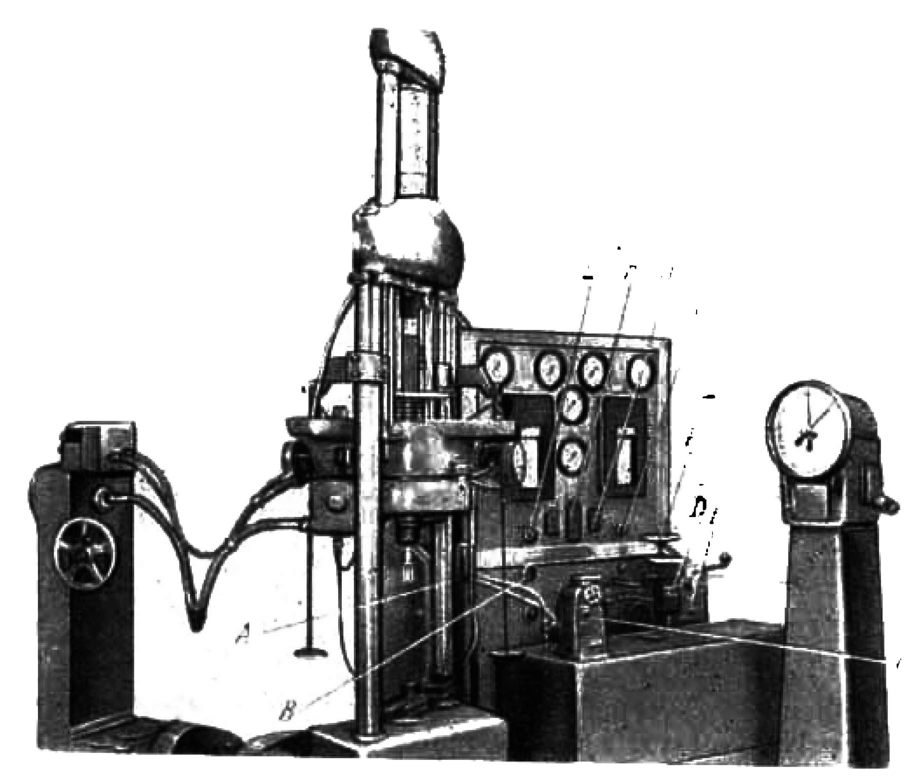


Fig. 154 | Máquina universal de 30 tf para ensayos con cargas combinadas *A*, conmutador del movimiento del agarrador inferior; *B*, volante para llenar de aceite los manómetros corrientes y de émbolo para efectuar la torsión; *C*, interruptor de la bomba del cilindro motor; *D*, válvula de vaciado del aceite de los manómetros de émbolo; *E*, interruptor de la bomba de presión interna; *F*, volante de conección de los balones de alta presión; *G*, volante de conección de los manómetros de baja presión; *H*, interruptor de la transmisión de torsión de la probeta; *K*, interruptor del compresor; *L*, volante para poner los límites de medición durante la torsión.

medidor de fuerza pendular para la tracción o compresión con cilindro, péndulo y aparato de diagramas;

transmisión mecánica para la torsión con motor, regulador de velocidad y árbol flexible.

La bancada de la máquina (fig. 155) tiene columnas inmóviles *2* y un cabezal también inmóvil, dentro del cual está montado el cilindro motor *9* con el chupón *10*; éste porta el cabezal móvil con tirantes y una mesa móvil de ensayo *7*.

Los agarradores *3* sirven para los ensayos a tracción, los agarradores *8* con un juego de dispositivos especiales para sujetar las probetas, a compresión. La distancia entre los agarradores *3*

es calculada para el ensayo de las probetas con una longitud de hasta 600 mm, ganando 350 mm gracias al desplazamiento del husillo del agarrador inferior *3* accionado por el motor, y otros 250 mm gracias al recorrido del chupón *10*. Entre las superficies de apoyo de los agarradores *8* se tolera una distancia de 50 a 300 mm.

Junto con los agarradores *3* y *8*, en el mismo eje con ellos, gira dentro de la mesa *7* un piñón que engrana con un tornillo sin fin sujetado inmóvilmente a dicha mesa. Esta tiene unos tetones laterales donde están situados los manómetros cuyos émbolos se apoyan contra las columnas *2*, inmovilizando así la mesa contra rotación.

Las bombas de seis chupones *18* y *22* accionadas por los motores *20* y *25* y gobernadas por medio de las manivelas *17* y *24* (regulación aproximada) y los volantes *16* y *23* (regulación exacta), son propias para excitar la fuerza longitudinal y la presión interna.

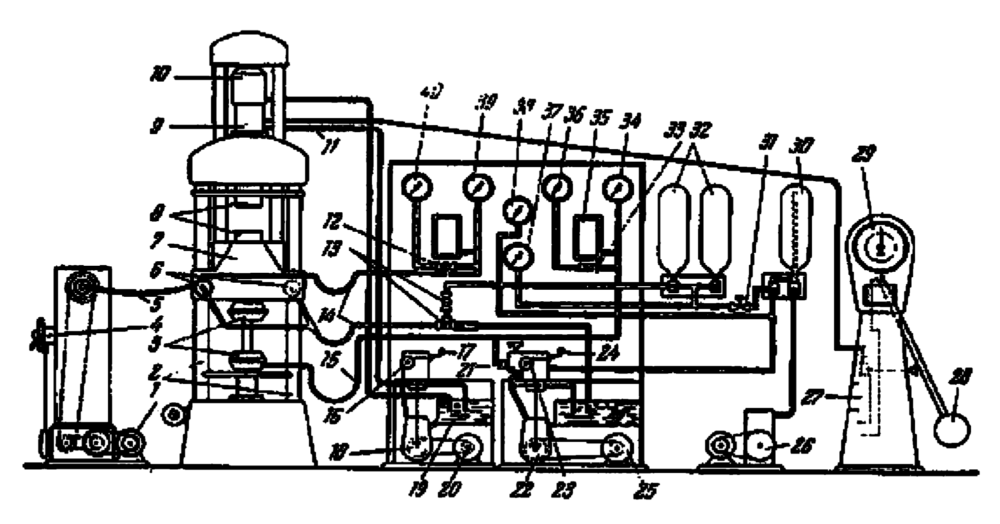


Fig. 155 | Esquema hidráulico de la máquina universal de 30 tf para los ensayos con cargas combinadas: *1*, motor; *2*, columnas inmóviles; *3*, agarradores de tracción; *4*, volante; *5*, eje flexible; *6*, manómetros de émbolo; *7*, mesa de ensayo; *8*, agarradores de compresión; *9*, cilindro motor; *10*, chupón; *11*, tubería hacia el cilindro motor; *12* y *13*, válvulas; *14* y *15*, mangueras; *16* y *17*, volante y manivela de regulación del suministro de aceite del cilindro; *18*, bomba; *19*, tanque de aceite; *20*, motor; *21*, válvula; *22*, bomba; *23* y *24*, regulación del suministro de aceite de los manómetros de émbolo, los balones y la probeta; *25*, motor; *26*, compresor; *27*, cilindro del medidor de fuerza; *28*, péndulo; *29*, escala del manómetro; *30*, balón para baja presión; *31*, válvula; *32*, balones para alta presión; *33*, válvula; *34*, *35* y *36*, manómetros para medir la presión en la probeta; *37* y *38*, manómetros para los balones; *39* y *40*, manómetros de émbolo.

La bomba *18* inyecta aceite del tanque de reserva *19* por la tubería *11* en el cilindro motor *9*, como resultado de lo cual el chupón *10* se levanta junto con el cabezal, los tirantes y la mesa *7*, y la probeta se comprime o se tracciona. La presión de aceite en el cilindro *9* se aumenta y por una tubería se transmite en el émbolo del cilindro *27* del medidor de fuerza. El émbolo actúa sobre el tirante y desvía el péndulo *28* proporcionalmente al esfuerzo que surge en la probeta.

El extremo corto superior del péndulo empuja una cremallera unida con las agujas de la escala *29* y con la pluma del aparato de diagramas que se traslada por la horizontal. Se puede colgar del péndulo pesos con las marcas *A*, *B* y *C* en tres combinaciones. De acuerdo con el valor de estos pesos la escala tiene tres límites de medición con el valor correspondiente de una división, y el diagrama va a tener por la horizontal una escala de fuerzas correspondiente, a saber: para el peso *A* los límites de medición son de 0 a 5000 kgf, el valor de una división es de 10 kgf, la escala de fuerzas en el diagrama es de 1 mm: 33,3 kgf; respectivamente para los pesos $A + B$ los límites son de 0 a 15 000 kgf, el valor es de 25 kgf, la escala, 1 mm: 100 kgf; para los pesos $A + B + C$ los límites son de 0 a 30 000 kgf, el valor es de 100 kgf y la escala es de 1 mm: 200 kgf.

Para evitar que el émbolo se trabe en el cilindro *27* del medidor de fuerza y disminuir la influencia de la fricción entre las paredes del émbolo y del cilindro sobre la precisión de las indicaciones en la escala *29*, el cilindro *27* es movido por un motor especial conectado automáticamente junto con la bomba *18*. En la parte superior del cilindro *27* hay una válvula de freno propia para una bajada suave del péndulo una vez destruida la probeta, y para prevenir una caída brusca de presión en el sistema de aceite.

La mesa móvil *7* se traslada durante el ensayo hacia arriba en el valor de la deformación longitudinal de la probeta, cuando ésta es sometida a compresión o tracción. Este desplazamiento es relacionado mediante una cremallera, unos árboles en forma de varillas cilíndricas y unos engranajes con el movimiento de la cinta de diagramas, sobre la cual la pluma traza por la vertical unos tramos que son proporcionales a la deformación de la probeta. La escala de deformación en el diagrama depende de la relación de transmisión de los engranajes y es establecida en los dos grados 1 : 1 y 1 : 2.

Al aumentar la presión en el cilindro motor *9*, una cantidad pequeña de aceite se filtra en el juego entre las paredes del chupón *10* y del cilindro, las engrasa, se acumula en una canaleta en la parte superior del cilindro y por un tubo se evacua en el tanque de reserva *19*.

Para el ensayo a compresión interna en los agarradores inmóviles *3* (inferior) y *8* (superior) están previstas unas perforaciones, a través de las cuales la probeta se llena de aceite. En dichas perforaciones se enrosca fuertemente un tubito unido mediante una manguera de alta presión *15* por el intermedio de la válvula *21* con la bomba *22* que suministra aceite del tangue de reserva.

Para mantener constante la presión en la probeta durante su dilatación en el proceso del experimento, en el dorso del tablero con manómetros se sitúan los balones *30* y *32* para aire comprimido. Durante los ensayos a presiones menores (hasta 100 at) el aire comprimido del balón *30* es un compensador suficiente de presión; si la presión es grande, es necesario conectar los balones *32*. Estos sirven también para llenar los manómetros de émbolo *6* de aceite.

Para poder empezar el ensayo, los balones para aire comprimido se cargan de antemano. Con este propósito se cierra la válvula *31* situada a la derecha, al lado del tablero con manómetros, y la válvula *21* en el montante de mando de la bomba *22*; luego se pone en marcha el motor del compresor *26* y en el balón *30* se echa el aire hasta una presión de 10 at lo que se controla en el manómetro *38*. Si hace falta cargar los balones *32*, la válvula *31* tiene que estar abierta, midiendo también la presión con el manómetro *37*. Tan pronto que la presión de aire en los balones alcance 10 at, hay que desconectar el motor del compresor. Entonces la válvula de retención en el balón *30* va a cerrar automáticamente la salida de aire de los balones. Una vez que se ha hecho esto, se conecta el motor *25* y la bomba *22* inyectará aceite en el balón *30* (también en los balones *32*, cuando la válvula *31* está abierta) hasta la presión necesaria, pero no mayor que 300 at.

La regulación del suministro de aceite en los balones se efectúa por medio de la manivela *24* y el volante *23* y se mide con los manómetros *38* y *37*.

Al inyectar aceite, el aire en los balones se comprime y llega a formar una almohada elástica de aire. Para aplicar a la probeta una presión interna constante hace falta abrir lenta y cuidadosamente la válvula *21*; entonces los tubos que vienen de la probeta se unen con tubos de los balones. La presión en la probeta llenada previamente de aceite, al igual que en los manómetros *34* y *36* y en el manómetro autorregistrador *35* aumentará bajo la acción de la almohada elástica de aire hasta el límite establecido en los balones. El manómetro *36* sirve para una medición más exacta de la presión que no sobrepasa de 100 at, abriendo previamente con este fin la válvula *33*; si hay posibilidad de que la presión en la probeta exceda de 100 at, se debe cerrar obligatoriamente la válvula *33* y medir la presión solamente con el manómetro *34*

hasta 300 at. Se puede conectar también el manómetro autorregistrador *35* que ofrece el diagrama de cambio de la presión interna en función del tiempo.

Los balones, en sus zócalos, tienen situadas las válvulas diferenciales que dejan escapar el aceite de ellos sólo cuando la diferencia de las presiones es pequeña; si la presión fuera de los balones cae bruscamente, las válvulas no dejan pasar el aceite en absoluto. Por eso durante la destrucción de una probeta hueca se le escapa una cantidad ínfima de aceite.

Antes de proceder al ensayo de torsión hace falta cargar los balones *32* hasta una presión de 300 at, y por medio de ellos llenar de aceite los manómetros de émbolo *6*, los manómetros *39*, *40* y el segundo manómetro autorregistrador, abriendo con cuidado las válvulas *13*. En las partes superiores de los manómetros corrientes y de émbolo hay tapones roscados que deben sacarse para desalojar el aire. Tan pronto que en los agujeros aparezca aceite, hay que apretar bien los tapones en sus lugares. El llenado de aceite se efectúa hasta que los émbolos de los manómetros de émbolo se apoyen con sus rodillos contra las planchas guías de las columnas *2* y la presión de aceite se eleve hasta el valor de 1 kgm según las indicaciones de los manómetros *39* y *40*. Al cerrar las válvulas *13* se corta el acceso de aceite de los balones a los manómetros corrientes y de émbolo.

Después de todo, en los agarradores se sujetan las probetas con cabezas cuadradas especiales que encajan en los asientos de los casquillos también cuadrados. Todos los agarradores *3* y *8* tienen asientos para los casquillos cuadrados, lo que permite realizar el ensayo a torsión con la acción simultánea de tracción o compresión.

La carga de torsión que se aplica a la probeta se crea por el motor *1* a través de un sistema de transmisiones por cadena, el árbol flexible *5* y una transmisión por tornillo sin fin. El motor *1* hace girar un piñón situado dentro de la mesa *7* junto con los agarradores *3* (superior) y *8* (inferior), sujetados a él, y la cabeza de la probeta. La otra cabeza de la probeta se mantiene inmóvil junto con el agarrador inferior *3* o el superior *8*. Para inmovilizarlos, éstos se sujetan mediante las traviesas que se apoyan contra las columnas *2*.

La velocidad de carga se regula mediante el volante *4* que varía el número de velocidades de la transmisión por cadena del motor al árbol flexible *5*. Dicha velocidad se establece dentro de unos límites que permiten torcer la probeta a un ángulo de 80 a 120° por minuto.

La resistencia ofrecida por la probeta a la torsión se transmite sobre la mesa por medio de los agarradores, el piñón y el tornillo sin fin. Los manómetros de émbolo *6* se apoyan con sus

émbolos sobre las columnas *2*; la presión de aceite en dichos manómetros se aumenta proporcionalmente al momento torsional y se transmite por el tramo superior de la manguera *14* a los manómetros *39* y *40* graduados en kgm. El manómetro *40* es propio para medir el momento torsional de hasta 80 kgm y se enchufa abriendo la válvula *12*. Si el momento de torsión en la probeta puede exceder de 80 kgm, la válvula *12* se cierra obligatoriamente y la medición se realiza solamente mediante el manómetro *39* hasta el momento máximo de 200 kgm. El manómetro autorregistrador permite obtener diagramas del momento torsional en función del tiempo o del ángulo de torsión.

La preparación y el arranque de la máquina se realizan como sigue:

a) *Ensayo a tracción o compresión.*

1. Se fija el límite de medición necesario, colgando o quitando los pesos del péndulo *28*, y el regulador de la válvula de freno del cilindro *27* se traslada en la marca del límite de medición correspondiente. Si hay necesidad de obtener el diagrama de ensayo, se hace endentar el tambor de la cinta de diagramas con los engranajes del árbol en forma de varilla cilíndrica de acuerdo con la escala elegida; la pluma se pone en la línea cero de la cinta de diagramas.

2. La probeta se sujeta en los agarradores especiales. El agarrador inferior *3* se sitúa previamente a una distancia necesaria para la probeta por medio de un motor ubicado sobre el pedestal de la bancada y conectado mediante el conmutador de botón *A* (fig. 154). El botón superior de éste sirve para poner el agarrador en movimiento hacia arriba, el botón inferior, hacia abajo; el intermedio sirve para la parada. Durante los ensayos a compresión la puesta preliminar de la distancia entre los agarradores *8* (fig. 155) se efectúa inyectando aceite en el cilindro motor *9*.

3. El motor *20* se pone en marcha oprimiendo el botón superior del interruptor *C* (fig. 154) y hace funcionar la bomba *18* (fig. 155) que se gobierna por medio de la manivela *17* y el volante *16*. Al coincidir la marca cero del disco de mando con la aguja inmóvil la bomba no alimenta de aceite el cilindro *9* y la probeta no se carga. Para cargar la probeta es necesario apretar la manivela *17* y desplazarla hacia izquierda; entonces la bomba empieza a suministrar aceite en el cilindro, originando la presión. Junto con la manivela se mueve también el disco de mando. Las marcas del disco señalan la velocidad de levantamiento del chupón *10* para el caso cuando falta la probeta.

En el proceso del ensayo la velocidad de carga se observa en el manómetro *29*, y su regulación exacta se efectúa mediante el volante *16* que hace girar con lentitud el disco de mando.

4. Al descomponerse la probeta, la manivela *17* se empuja hacia derecha hasta el tope, abriendo así la válvula de vaciado, y el aceite se escurre del cilindro *9* por la tubería *11* en el tanque. Se desconecta el motor *20*, se toman las lecturas en el manómetro *29* y la probeta se saca de los agarradores.

b) *Ensayos a presión interna.*

1. Una probeta hueca se sujeta en los agarradores y la manguera *16* se atornilla con fuerza al agarrador inmóvil (el inferior *3* o bien el superior *8*) que tiene una perforación para hacer pasar el aceite.

Para llenar la probeta de aceite hay que unir su espacio interior con la bomba *22*, abriendo con este fin la válvula *21* y haciendo girar su volante a la izquierda. Después se conecta el motor *25* apretando el botón superior del interruptor *E* (fig. 154). Cuando la probeta ya está llena de aceite, se cierra la válvula *21* (fig. 155) haciendo girar el volante a la derecha y, apretando el botón inferior del interruptor *E*, se para el motor. El suministro de aceite por la bomba *22* se regula mediante la manivela *24* y el volante *23* por analogía con la bomba *18*.

2. Los balones *30* y *32* se cargan de aire comprimido, apretando el botón superior del interruptor *K* (fig. 154) y conectando el motor del compresor *26* (fig. 155). Simultáneamente se debe cerciorarse de que las válvulas *21* y *13* están cerradas. Cuando en los manómetros *38* y *37* la presión de aire en los balones alcanza 10 at, se desconecta el compresor apretando el botón inferior del interruptor *K* (fig. 154). Luego se conecta el motor de la bomba *22*. El aceite entra en los balones *30* y *32*, estando la válvula *21* cerrada, y la presión dentro de ellos se aumenta. Una vez alcanzada la presión en los balones el valor necesario, pero no mayor que 300 at que se observa en los manómetros *38* y *37*, la bomba *22* se desconecta.

Si hace falta cargar solamente el balón *30*, entonces, haciendo girar el volante *F* a la derecha (fig. 154), se cierra previamente la válvula *31* (fig. 155) y la presión se mide sólo con el manómetro *38*.

3. Se pone el límite de medición necesario. El manómetro *36* sirve para medir en la probeta una presión no mayor que 100 at; se enchufa mediante la válvula *33* haciendo girar el volante *G* a la izquierda (fig. 154). En el caso de una presión grande hay que desconectar obligatoriamente el manómetro *36*, haciendo girar el volante *G* a la derecha hasta no más, y medir la presión solamente con el manómetro *34* (fig. 155). El manómetro autorregistrador se enchufa trasladando hacia arriba la palanca situada en el lado derecho de la bancada.

4. Para crear en la probeta la presión interna, la entrada de aceite en ésta se regula abriendo lenta y cuidadosamente la vál-

vula *21*. El valor de la presión en la probeta se controla con los manómetros *36* y *34*.

Una vez destruida la probeta o al terminar los ensayos, la válvula *21* se cierra, la manivela *24* que gobierna la bomba se pone a la derecha hasta no más, el aceite se echa del sistema en el tanque de reserva y la probeta se saca de los agarradores.

c) *Ensayos a torsión.*

1. Se fijan los límites de medición, poniendo y desconectando el manómetro *40* por medio del volante *L* (fig. 154).

2. Haciendo girar los volante *B* y *F* a la izquierda, se abren las válvulas *13* (fig. 155) y los manómetros corrientes *39* y *40* y de émbolo *6* se llenan de aceite de los balones *32* cargados de antemano.

3. La probeta con cabezas cuadradas se sujeta en los agarradores con casquillos también cuadrados.

4. El motor *1* se pone en marcha apretando el botón superior del interruptor *H* (fig. 154), y la velocidad de carga de la probeta se regula mediante el volante *4*.

5. Una vez que se ha realizado el ensayo, la probeta se saca de los agarradores, y de los manómetros de émbolo y otros se echa el aceite, abriendo con este fin la válvula inferior *13* y haciendo girar el volante *D* a la derecha.

Si los ensayos son combinados, la preparación y el arranque de la máquina se realizan para cada tipo de carga de acuerdo con el orden señalado.

CAPÍTULO IX

Aparatos para las pruebas de dureza

§ 23. PRENSA DE BRINELL (TIPO ALFA)

La prensa de Brinell se utiliza para comprobar la dureza de los metales, aplicando contra la probeta una bola de acero. Dicha prensa desarrolla una fuerza de presión de hasta 3000 kgf y es un dispositivo con excitador de fuerza hidráulico y accionamiento manual.

La construcción y el esquema de trabajo de la prensa de Brinell pueden verse en la fig. 156. Dentro de una bancada maciza de fundición *1* se monta el tornillo elevador *3*. Este, al girar el volante *2*, obtiene el movimiento de avance a lo largo de su eje geométrico. Se termina con la mesa *4* donde se sitúa la probeta.

En un alojamiento de la parte superior de la bancada *1* está situado el cilindro motor *7* que tiene dos torneados interiores, uno inferior (mayor) de un diámetro D_1 y otro superior (menor) de un diámetro D_2. El eje geométrico del cilindro forma con el eje del vástago *6* de la prensa y del tornillo elevador *3* una recta que no es sino el eje de fuerza de la prensa.

El émbolo del torneado inferior del cilindro motor *7* se apoya contra el vástago *6* que termina con una bola de acero *5*, cuyo diámetro se elige, de acuerdo con las condiciones del ensayo, por la tabla *12* (véase la pág. 54). Por esa tabla se determina también el valor del peso Q igual al peso del balancín *9* con pesas. El balancín se apoya sobre el pequeño émbolo del torneado superior que tiene el diámetro D_2.

Por medio de la bomba de mano *8* en el cilindro *7* se inyecta aceite hasta que el balancín *9* con pesas salga a la superficie. El peso Q origina en el cilindro *7* una presión

$$p = \frac{Q}{\frac{\pi D_2^2}{4}}.$$

Esta presión, ejerciendo sobre el émbolo del torneado inferior, se transmite sobre el vástago *6* en forma de una fuerza P igual a

$$P = p\frac{\pi D_1^2}{4}.$$

Así, pues, la presión P sobre la probeta depende del peso Q y los diámetros del cilindro 7. Se expresa por la siguiente igualdad:

$$P = Q\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2. \tag{89}$$

El cilindro 7 se comunica directamente con el dinamómetro 10, cuya esfera marca el valor de la fuerza P que se transmite sobre

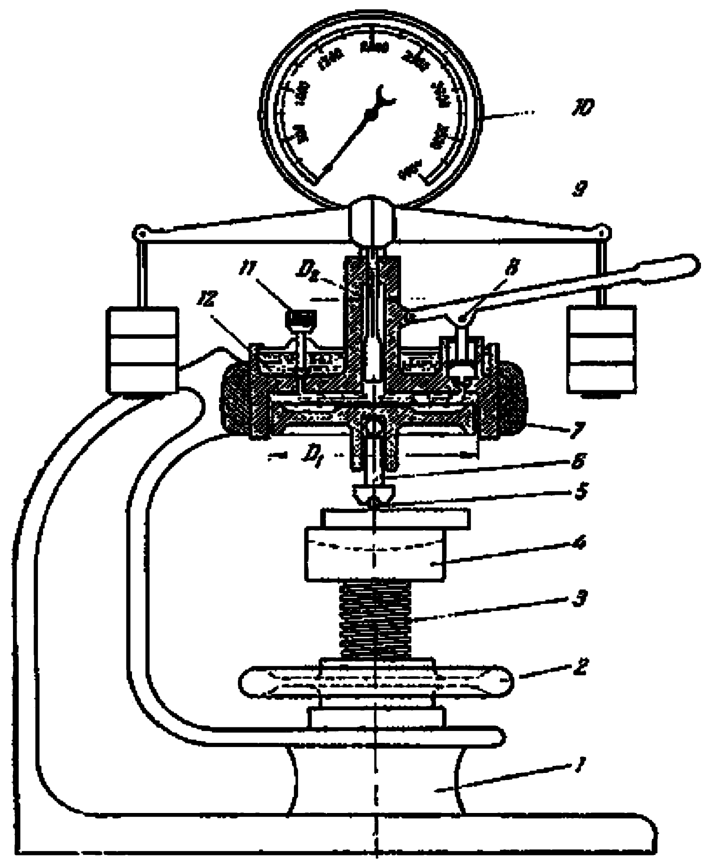


Fig. 156 | Prensa de Brinell (tipo Alfa): *1*, bancada; *2*, volante; *3*, tornillo elevador; *4*, mesa; *5*, bola; *6*, vástago; *7*, cilindro motor; *8*, bomba de mano; *9*, balancín; *10*, dinamómetro; *11*, cabeza de la válvula; *12*, tanque de aceite.

la probeta, lo que permite controlar el peso de las pesas colgadas del balancín 9.

La prueba de dureza en una prensa del tipo Alfa se realiza como sigue: colgando las pesas que corresponden al diámetro elegido de la bola de acero 5 y situando la probeta sobre la

mesa *4*, esta última se levanta hasta quedarse la bola bien apretada contra la probeta. Se cierra la válvula del tanque de aceite *12* haciendo girar su cabeza *11*, y mediante la bomba *8* el aceite se inyecta en el cilindro *7* hasta que el balancín *9* salga a la superficie. El dinamómetro *10* marcará la carga *P* que corresponde al diámetro de la bola. El balancín *9* se mantiene a flote durante todo el tiempo fijado para el experimento, desenroscando después la cabeza *11* y dejando salir el aceite del cilindro *7*. Luego, haciendo girar el volante *2* se baja la mesa *4*, se quita la probeta y se mide el diámetro de la huella en dos planos mutuamente perpendiculares por medio de una placa especial (véase la fig. 27), un microscopio o una lupa.

§ 24. APARATO PARA DETERMINAR LA DUREZA ROCKWELL

La estructura del aparato para determinar la dureza Rockwell se funda en el método de penetración de un cono de diamante o una bola de acero de pequeño diámetro en la superficie. En la fig. 157 se muestra el esquema del aparato ГЗИП (GZIP) para determinar la dureza Rockwell. Consta de una bancada *1* unida rígidamente mediante las columnas *2* con una traviesa maciza perfilada *4*. La bancada tiene un tornillo vertical *16* con un volante *17* para levantar tanto el tornillo como una mesa con la probeta *15*. Dentro de la traviesa *4* se monta un casquillo, cuyo eje coincide con el eje vertical del tornillo que es el eje de fuerza del aparato. Dentro del casquillo se encuentran el vástago *14* con una punta desmontable que se termina con una pirámide de diamante o una bola de acero, el resorte calibrado *13* y el prisma doble *11*. Sobre el prisma se apoya la palanca de carga *8* empalmada mediante un perno por su extremo derecho a la traviesa *4*, y que porta en otro extremo los pesos recambiables *3*. Este extremo se cuelga, mediante el grillete *5*, de la palanca de soporte *6* que tiene un eje inmóvil en el extremo izquierdo, un gatillo de levantamiento *9* en el derecho y un freno de aceite *7* en medio. El indicador *12*, cuyo perno de medición se cuelga de la palanca *10*, apoyada a su vez sobre la barra del vástago *14*, está sujetado rígidamente al tope de la traviesa *4*. Dicha barra pasa libremente por los agujeros del platillo del resorte calibrado *13*, del prisma *11* y de la palanca de carga *8*.

La prueba en el aparato ГЗИП (GZIP) se realiza tal como sigue: al elegir en la tabla 15 (véase la pág. 61) la carga *P*, los pesos correspondientes *3* se cuelgan de la palanca *8*. El peso de la palanca, las suspensiones y el peso inferior estacionario dan una carga de 60 kgf sobre el vástago. Luego sobre el peso inferior se coloca el segundo peso que aumenta la carga en 40 kgf, siendo $P = 100$ kgf para los ensayos con bola, y el tercer peso que

aumenta la carga en 50 kgf más y sirve para ensayar con cono de diamante, cuando $P = 150$ kgf.

La probeta preparada *15* se sitúa sobre la mesa del tornillo vertical *16*, levantándola hasta que conecta con la punta. El siguiente levantamiento del tornillo se efectúa lenta y cuidadosamente, haciendo girar el volante *17*. Se levantan el vástago, el

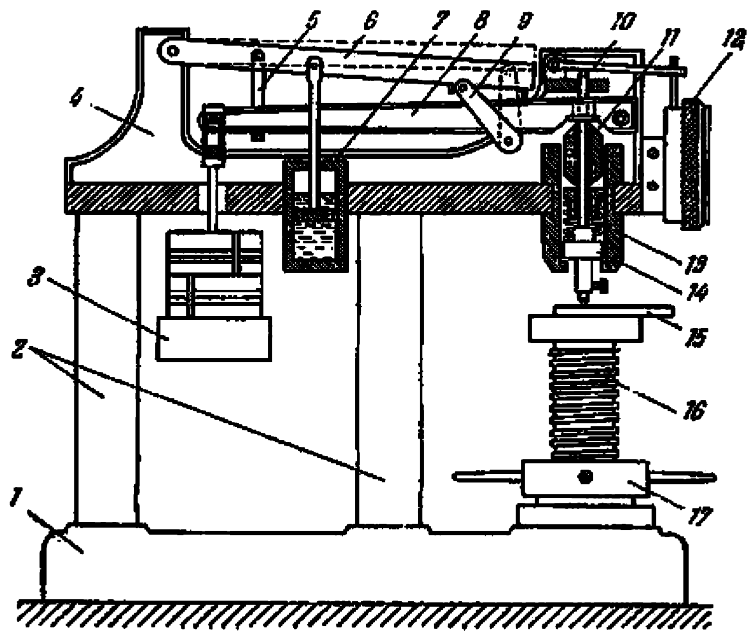


Fig. 157 | Aparato para determinar la dureza Rockwell: *1*, bancada; *2*, columnas; *3*, pesos; *4*, traviesa; *5*, grillete; *6*, palanca; *7*, freno de aceite; *8*, palanca de carga; *9*, gatillo; *10*, palanca del indicador; *11*, prisma; *12*, indicador; *13*, resorte calibrado; *14*, vástago; *15*, probeta; *16*, tornillo; *17*, volante.

resorte *13* y el prisma *11* hasta que este último choque con la palanca de carga *8*; acto seguido, el resorte *13* que origina la carga inicial P_0 empieza a comprimirse, el vástago *14* sigue levantándose y con su barra se apoya contra la palanca *10*, por medio de la cual se levanta el perno de medición del indicador *12*.

Se sigue levantando el tornillo, observando paralelamente la esfera del indicador *12*, y se lo para cuando las manecillas van a ocupar la posición vertical, llegando siempre la manecilla menor hasta el punto rojo (véase la fig. 29). En esta posición el resorte comprimido *13* transmite sobre el vástago y, por consiguiente, la probeta la carga inicial $P_0 = 10$ kgf. Entonces se hace girar el

anillo corrugado del indicador junto con la esfera hasta la coincidencia de las divisiones *C*0 y *B* 30 con la manecilla mayor (véase la fig. 29). Luego, pasando el gatillo *9* en la posición inclinada, se suelta la palanca de soporte *6*, aplicando así la carga principal que se transmite por la palanca de carga *8* sobre el vástago y la probeta.

El freno de aceite *7* sirve para una aplicación suave de la carga principal; la bajada de la palanca *6* se retarda a causa de que el aceite pasa lentamente a través de unos orificios pequeñísimos del émbolo.

La acción de la carga principal se mantiene durante 4—8 s (duración del funcionamiento del freno de aceite) hasta la disminución del movimiento de la manecilla del indicador, pero, en todo caso, no mas de 1 s después de su parada. Luego se quita la carga principal poniendo suavemente el gatillo *9* en la posición vertical, y el número de dureza se lee en la escala del indicador *12*. Haciendo girar el volante *17* en la dirección contraria, se logra trasladar el tornillo y la mesa hacia abajo, y la probeta se descarga definitivamente.

§ 25. APARATO PARA DETERMINAR LA DUREZA CON PIRÁMIDE DE DIAMANTE

En la fig. 158 puede verse el aparato de mesa GZIP para las pruebas de dureza con pirámide de diamante. El proceso de ensayo con dicho aparato es automatizado y su rendimiento es sensiblemente mayor que el de otros instrumentos análogos.

El aparato GZIP tiene el tornillo elevador *3* con volante y una mesa para hacer llegar la probeta hasta el vástago *5* con una punta piramidal de diamante. El vástago y el microscopio montados sobre una placa común, pueden girar alrededor del eje vertical de la cabeza *4* de la bancada del aparato, lo que permite coincidir el objetivo *6* del microscopio o el eje del vástago *5* con el eje del tornillo (eje de fuerza del aparato). La carga se transmite sobre el vástago *5* de la palanca de carga *9* a través del vástago intermedio *8*, siempre apretado contra la palanca mediante dos resortes.

Del brazo largo de la palanca cuelgan los pesos de recambio, mediante los cuales puede obtenerse una carga sobre el vástago de 5 a 120 kgf. Bajo la cubierta *11* en la bancada del aparato se encuentra el freno de aceite con un peso pesado que permite regular la duración de carga de la probeta de 10 a 30 s; allí mismo está situado el sistema de palancas para la bajada o el levantamiento automático de la espiga *10* que sostiene la palanca de carga, quitando así la carga del vástago.

Antes de empezar el ensayo, el aparato se pone en la posición de trabajo. Con este fin se cuelgan los pesos correspondientes de la palanca *9*; el eje del vástago *5* se coincide con el eje del vástago intermedio *8*, haciendo girar la planca alrededor del eje de la cabeza *4* hasta no más, y trasladando la manivela *1* hacia abajo

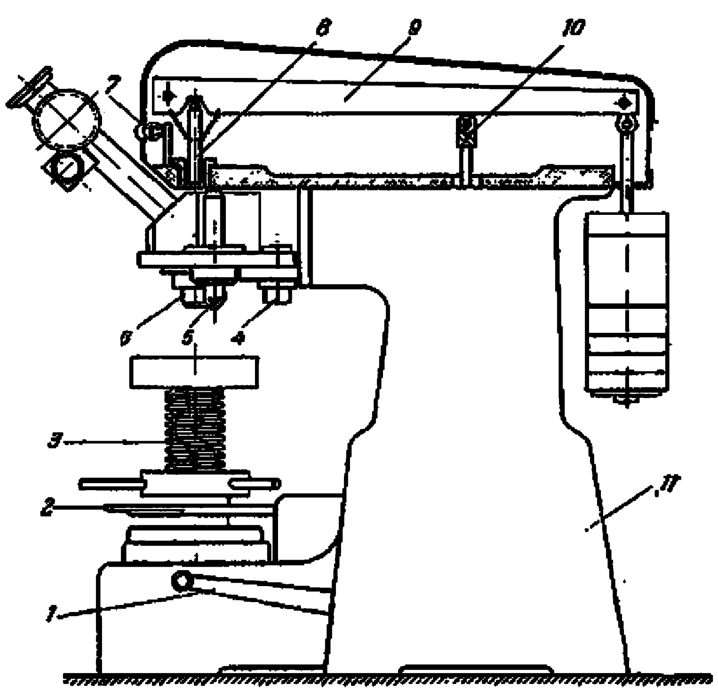


Fig. 168 | Aparato para determinar la dureza con pirámide de diamante: *1*, manivela para alzar el accionamiento de carga; *2*, pedal de arranque; *3*, tornillo elevador; *4*, cabeza de la bancada; *5*, vástago; *6*, objetivo del microscopio; *7*, bombilla; *8*, vástago intermedio; *9*, palanca de carga; *10*, espiga; *11*, cubierta.

se alza el mecanismo del accionamiento de carga. La probeta preparada se sitúa en la mesita de prueba y se la aprieta levemente por medio del tornillo *3* contra la funda de la punta de diamante. La funda se enrosca en el casquillo del vástago *5* para proteger la pirámide de diamante de los deterioros mecánicos y para facilitar el ajuste de los juegos iniciales mínimos entre los vástagos *5* y *8*, al igual que entre el diamante y la probeta.

El ensayo se empieza ejerciendo presión sobre el pedal de arranque *2*, lo que pone en marcha el freno de aceite y el sistema de palancas del mecanismo de carga unido con éste. Entonces el peso sujetado en el vástago del émbolo del freno de aceite em-

pieza a descender; junto con él desciende la espiga *10*, se suelta la palanca de carga *9*, transmitiendo la carga sobre el diamante durante el tiempo establecido. La siguiente bajada del peso origina, por medio de un sistema de palancas, el levantamiento de la espiga *10*, y el diamante se descarga. La duración de carga se regula de antemano por medio de un tornillo especial situado en la tapa del freno de aceite, y durante la prueba es marcada por una bombilla de señales *7* que se apaga al cargar y se enciende al descargar. Así, pues, el proceso de la prueba se desarrolla automáticamente y es completamente uniforme.

Una vez que se ha concluido el ensayo, la probeta se libra del diamante, dando con el volante media vuelta, lo que hace bajar el tornillo *3*, y el objetivo del microscopio se coincide con el eje de fuerza del aparato. Luego el microscopio se sitúa, por el intermedio del tornillo micrométrico, de tal manera que la huella se encuentre enfocada exactamente en el centro del objetivo, midiendo consecutivamente ambas diagonales de ésta. Anotando los resultados en el registro, se vuelve a poner el vástago *5* en el eje de fuerza del aparato y la prueba se repite, pero en otro lugar de la probeta.

§ 26. APARATO DE SHORE

El aparato de Shore es propio para determinar la dureza por el método de rebote elástico. Consta (fig. 159) de una bancada con la columna *2*, por la cual se desplaza el casquillo móvil perfilado *3* con el tornillo de retención *4*. En el casquillo se fija rígidamente un tubo de cobre *7*, dentro del cual se encuentra el mecanismo del martillo con una punta de diamante. A la parte superior del tubo *7* se empalma el indicador *6*, a la parte inferior, la caja *10* con el nivel *9* y un mecanismo para levantar y bajar el martillo. El tubo tiene sujetada al dorso la cremallera *5* engranada con un piñón del volante *8*, con ayuda de los cuales se puede mover el tubo por la vertical.

Antes de empezar el ensayo, el casquillo móvil *3* se sujeta mediante el tornillo de retención *4* a una altura, necesaria para situar la probeta sobre la mesita de prueba; por medio de dos tornillos *1* ubicados dentro de la bancada, el aparato se instala exactamente por el nivel *9* para garantizar una caída estrictamente vertical del martillo. Haciendo girar el volante *8*, se baja el tubo de cobre *7*, apretándolo bien, pero no muy fuerte, contra la probeta por medio de un casquete.

Luego se hace girar la manecilla *11* en el sentido de las manecillas del reloj hasta no más. En este momento el martillo que tiene una longitud de alrededor de 18 mm, se suelta automáticamente y cae sobre la probeta, apretada contra el tubo *7* por el

casquete. Después del impacto el martillo rebota de la probeta a una altura que caracteriza la dureza del material, y en esta posición es retenido por medio de unas bolas situadas con holgura en un casquillo cónico que abraza el martillo dentro del tubo *7*. Durante todo este tiempo la manecilla *11* está apretada contra el apoyo. Al haberla soltado, se libera un resorte que se encuentra dentro de ella, bajo cuya acción se desplaza por la vertical dentro del tubo *7* una cremallera especial y hace girar la aguja del indicador a un ángulo proporcional a la altura del rebote del martillo. La lectura que marca la aguja en la esfera del indicador no es sino el número de

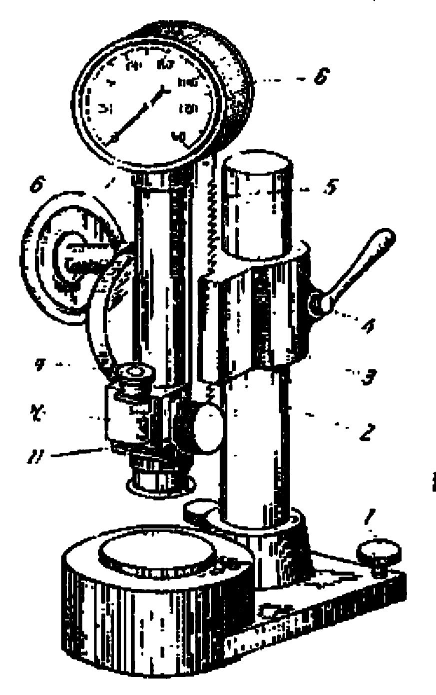


Fig. 159 | **Aparato de Shore.** *1*, **tornillo;** *2*, **columna;** *3*, **casquillo perfilado;** *4*, **tornillo de retención;** *5*, **cremallera;** *6*, **indicador;** *7*, **tubo de cobre;** *8*, **volante;** *9*, **nivel;** *10*, **caja;** *11*, **manecilla de caída.**

dureza Shore. La esfera es dividida en 140 divisiones iguales que señalan convencionalmente la dureza Shore, siendo tomada la dureza del acero para herramientas por 100 unidades.

Al anotar las indicaciones de la aguja en el registro, se quita el tubo de cobre *7* haciendo girar el volante *8*, y la probeta se libera para la prueba siguiente.

Cuando es necesario ensayar piezas voluminosas que no caben en el espacio de prueba del aparato, el tubo *7* se saca del alojamiento del casquillo *3*, se lo pone sobre la mesa y, agarrándolo con la mano izquierda en la posición estrictamente vertical, se efectúa el impacto, haciendo girar la manecilla *11* con la mano derecha. La ventaja principal del aparato de Shore consiste en su gran rendimiento que permite determinar con rapidez la homogeneidad del material, la influencia de la temperatura de recocido, del tratamiento superficial, etc, sobre la dureza, sin dejar huellas visibles sobre la superficie de la probeta.

§ 27. APARATO PARA DETERMINAR LA DUREZA POR RAYADO

El aparato para determinar la dureza por rayado (fig. 160) consta de un carro móvil *1* con la mesa *2* para la probeta, la palanca *4* y dos pesos. El carro *1* se mueve en dos direcciones mutuamente perpendiculares, a lo largo y de través de la palanca *4*. La mesa de ensayo *2* tiene la superficie de apoyo esférica que permite situar la probeta horizontalmente. La palanca *4* se apoya con los prismas *6* sobre un montante situado en su centro. En el extremo del brazo izquierdo de la palanca *4*, encima del carro, está sujetado el cono de diamante *3*, en el extremo opuesto hay una aguja que marca la desviación de la palanca con respecto a la

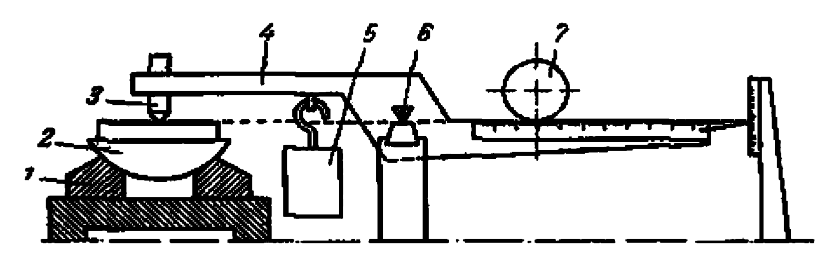


Fig. 160 | Aparato para determinar la dureza por rayado: *1*, carro; *2*, mesa; *3*, cono de diamante; *4*, palanca; *5*, contrapeso; *6*, prisma; *7*, peso.

posición horizontal. Del brazo izquierdo de la palanca cuelga el contrapeso inmóvil *5*, mientras que en el brazo derecho hay una regla con divisiones, a lo largo de la cual se desplaza el peso *7*.

Para realizar el ensayo, la probeta se sitúa sobre la mesa *2* y se la ajusta por medio del nivel de tal manera que la superficie superior esté estrictamente horizontal. El peso *7* se desplaza en la posición izquierda extrema, transmitiendo al diamante una presión de 50 gf. Trasladando el carro *1* unas cuantas veces perpendicular y paralelamente a la palanca *4*, se traza con el diamante sobre la probeta algunas líneas paralelas. El ancho de las rayas se mide con ayuda de un microscopio de precisión y se toma el promedio. La cantidad recíproca al ancho medio de las rayas obtenidas con el peso de 50 gf no es sino el número de dureza por rayado.

§ 28. APARATO PARA DETERMINAR LA MICRODUREZA

Los aparatos para determinar la microdureza no difieren esencialmente, por su diseño, de los aparatos correspondientes para determinar la macrodureza. Esos aparatos se fabrican en forma de algunas instalaciones que constan de un microscopio con el

ocular micrométrico para medir las huellas, y un mecanismo para cargar y situar exactamente la punta.

En la fig. 161 puede verse el esquema de uno de esos aparatos del sistema ИМАШ (IMASH). El aparato tiene la columna *1* con una base maciza. A lo largo de la columna, al hacer girar un anillo con rosca, se desplaza el casquillo *2* con un soporte; también

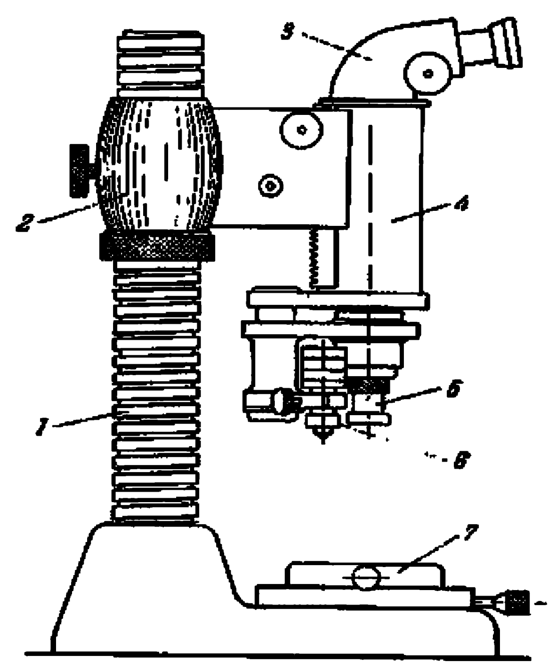


Fig. 161 | Aparato para determinar la microdureza: *1*, columna; *2*, casquillo; *3*, micrómetro ocular; *4*, tubo; *5*, objetivo del microscopio; *6*, vástago; *7*, mesita de ensayo.

en las guías del soporte se desplaza a su vez el tubo *4* con ayuda de una cremallera y un tornillo micrométrico. Sobre el tubo se pone un micrómetro ocular inclinado *3* para medir las huellas, y en la parte inferior se sujeta un soporte, en el cual se monta el vástago *6* con un dispositivo de carga y el objetivo de centrado *5* del microscopio con un foco de luz especial. El vástago *6* se termina con una pirámide de diamante con una base cuadrada y con el ángulo en el vértice de 136°. En la bancada, debajo del tubo, se sitúa la mesita de ensayo *7* que mediante unos tornillos micrométricos puede desplazarse junto con la probeta en dos direcciones del plano horizontal, lo que es indispensable para una situación exacta de la probeta.

Para efectuar la prueba, la probeta se sitúa sobre la mesita *7*, tratando de lograr que la superficie de trabajo esté en posición

estrictamente horizontal, se elige en ella el lugar para la huella y se la centra en el campo del microscopio. En vez del objetivo del microscopio, exactamente sobre el lugar elegido para la huella, se instala el vástago *6* con el diamante, se lo carga con la fuerza dada y se lo mantiene bajo carga el tiempo necesario (generalmente, empezando de 5 s para substancias duras y hasta 3 min para las blandas). Luego se quita la carga, se vuelve a poner el microscopio en su lugar sobre la microhuella obtenida, y por medio del micrómetro ocular se mide la longitud de la diagonal de la huella.

En algunos modelos del aparato tanto el vástago como el microscopio están sujetados sobre el soporte inmóvilmente en las posiciones fijadas con exactitud. Entonces la probeta, una vez que se ha elegido bajo el microscopio el lugar para la prueba, se desplaza junto con la mesita bajo el vástago para obtener la huella, y se vuelve de nuevo bajo el microscopio para medir la longitud de la diagonal de la huella.

Generalmente, el aparato está dotado de una instalación para el fotografiado de las microestructuras y las huellas.

CAPÍTULO X

Máquinas de acción dinámica

§ 29. MAQUINA UNIVERSAL WPM CON FUERZA DE HASTA 100 TF CON PULSADOR

La máquina universal WPM (R.D.A.) es propia para los ensayos a tracción, compresión o flexión, cuando la carga es muchas veces repetida. Permite aplicar sobre la probeta cargas estáticas de hasta 100 tf y cargas pulsatorias de hasta 50 tf, siendo éstas bilaterales. La carga pulsatoria se aplica con una frecuencia de 250 y 500 ciclos por minuto. La máquina está dotada de un regulador especial para mantener constante la amplitud de la carga pulsatoria dada.

La máquina consta de las siguientes cuatro partes principales (fig. 162): una bancada con cilindro y agarradores; un excitador de fuerza con bomba, motor y un dispositivo de mando; un pulsador con motor y unos dispositivos de regulación; un medidor de fuerza con péndulo, escalas de carga y un dispositivo de diagramas.

Examinemos todas estas partes de la máquina.

La bancada tiene una base maciza donde se sujeta sobre un husillo el agarrador inferior *1* de la máquina. Este, por medio de un motor situado sobre la base corre en dirección vertical para poder instalar la probeta durante el ensayo a tracción. La base de la bancada se une por medio de dos columnas de acero con el cabezal inmóvil superior, dentro del cual se monta el cilindro motor *3*. Su émbolo *4* tiene sujetado un bastidor móvil que consta de un cabezal, dos tirantes pasando a través de los agujeros del cabezal inmóvil y el agarrador superior *2*.

Al inyectar aceite en el cilindro *3*, el émbolo 4 arrastra el bastidor móvil junto con el agarrador *2*, sometiendo a tracción la probeta situada en el espacio inferior de ensayo, y a compresión o flexión las probetas situadas entre el agarrador *2* y el cabezal inmóvil. El plano superior prolongado del agarrador *2* sirve de mesa sobre la cual se sitúan los apoyos para el ensayo de las probetas a flexión, o la plancha inferior de apoyo para la compresión. En el primer caso de la base del cilindro *3* se cuelga un prisma especial; en el segundo, la plancha superior de apoyo.

Las dimensiones de la máquina permiten realizar los ensayos a tracción de las probetas con una longitud de 150 a 500 mm; a compresión, con una altura de hasta 400 mm y a flexión, con un vano de 50 a 1200 mm.

En los agarradores *1* y *2* se introducen mordazas recambiables de apriete que tienen unas superficies acanaladas templadas. Dos juegos de mordazas son destinadas para probetas redondas con unos diámetros de 20 a 40 mm y de 40 a 60 mm y un juego para probetas planas con un espesor de hasta 35 mm y un ancho de

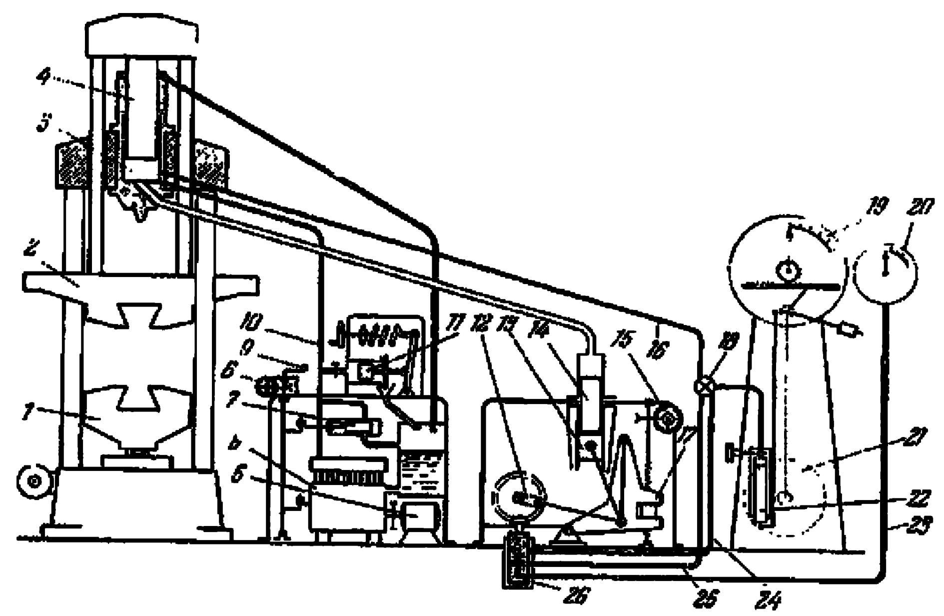


Fig. 162 | Esquema de la máquina universal WPM con fuerza de hasta 100 tf con pulsador: *1* y *2*, agarradores; *3*, cilindro motor; *4*, émbolo; *5*, motor; *6*, bomba; *7*, válvula de retención; *8* y *9*, volante y manivela de regulación del suministro de aceite; *10*, tubería de aceite hacia el cilindro motor; *11*, válvula de émbolo; *12*, cigüeñal; *13*, colisa; *14*, émbolo (chupón) del pulsador; *15*, volante de desplazamiento de la colisa; *16*, tubería de aceite hacia el medidor de fuerza; *17*, mandril; *18*, válvula; *19*, escala; *20*, manómetro mínimo; *21*, péndulo; *22*, cilindro del medidor de fuerza; *23*, *24* y *25*, tuberías de aceite; *26*, distribuidor.

hasta 125 mm. Además, hay mordazas especiales para probetas con hombros y con rosca.

El excitador de fuerza de la máquina universal WPM es una bomba *6* de *12* cilindros accionada por un motor *5*. La bomba suministra aceite por la tubería *10* al cilindro motor *3* con el fin de aplicar la carga estática sobre la probeta. El excitador se monta dentro de una caja de metal y se ubica al lado de la bancada.

Sobre la caja se sitúa una columna de mando de la velocidad de suministro de aceite. La manivela *9* sirve para un cambio rápido de la velocidad (reglaje aproximado) y el volante *8* con una transmisión por tornillo sin fin, para un cambio lento (reglaje

exacto). Haciendo girar la manivela *9* en contra del sentido de las manecillas del reloj, se cierra primeramente la válvula de retención *7* que comunica la tubería *10* con el tanque de aceite y luego se aumenta el agujero para el aceite que se inyecta en el cilindro motor.

Con el propósito de regular la velocidad de levantamiento del émbolo *4*, en el disco de la columna de mando hay marcas que señalan el desplazamiento de éste en mm/min. Cuando la manivela de mando se encuentra en la marca cero, la válvula de retención *7* está cerrada y en el cilindro motor *3* se mantiene una presión constante sin que se levante el émbolo *4*. Para dejar escapar el aceite del cilindro motor se debe abrir la válvula de retención *7*, haciendo girar la manivela de mando en el sentido de las manecillas del reloj más allá de la marca cero.

La regulación exacta de la velocidad de suministro de aceite se efectúa mediante el volante *8*, haciendo las mismas operaciones que cuando se manipula la manivela *9*, pero a un ritmo lento.

La conexión y desconexión del motor *5* se realiza por medio de un interruptor de botón situado en la columna de mando. El aceite que se infiltra del cilindro motor se concentra en su parte superior y se evacua de tanque de reserva por un tubo especial.

El pulsador está montado detrás de la máquina de ensayo y el excitador de fuerza; sirve para crear carga pulsatoria que surge al bajar y restablecer alternativamente la presión en el cilindro motor. El pulsador consta de un cilindro comunicado por medio de una tubería de sección grande con el cilindro motor, y un émbolo (chupón) *14* accionado por un motor eléctrico. El movimiento del motor se transmite al cigüeñal *12* que tiene acoplado un mecanismo de cuatro eslabones que mueve la colisa *13*. Esta empuja el chupón *14* solamente hacia arriba, mientras que el retroceso se garantiza por la presión de aceite en el cilindro del pulsador. Así se realiza la pulsación de la presión de aceite en el cilindro motor, lo que lleva a la pulsación de la carga que se transmite sobre la probeta por medio del agarrador superior *2*.

La magnitud de la carga pulsatoria depende del recorrido del chupón *14* o de la colisa que lo empuja. El recorrido de la colisa se varía de 0 a 60 mm; el cambio se efectúa al hacer girar el volante *15* que mediante la transmisión por tornillo sin fin y un husillo hace correr en el sentido vertical la "cola" del mandril *17* que gira alrededor de su articulación inferior inmóvil. En la posición extrema del mandril, cuando el eje de su articulación superior coincide con el eje de la articulación de la colisa *13*, ésta alcanza el clímax y se queda inmóvil, es decir, no hay pulsación, pero el cigüeñal *12* está en movimiento. Cuando la "cola" del mandril *17* baja, el recorrido de la colisa *13*, partiendo de su punto

superior, se aumenta proporcionalmente y empieza la pulsación de la carga.

La frecuencia de la pulsación se determina por la velocidad de giro del cigüeñal *12*; se varía al cambiar de lugar correas de transmisión en las poleas escalonadas del motor eléctrico y el cigüeñal y es de 250 ó 500 ciclos por minuto. También es posible cambiar suavemente la frecuencia de la pulsación, si se utiliza un motor de corriente continua, haciendo la conexión por el intermedio de un reóstato. Además, la máquina posee un dispositivo especial complementario que permite retardar el cambio de la carga de 5 a 20 ciclos por minuto. El contador de revoluciones, enlazado con el cigüeñal, va marcando cada 100 ciclos.

Para que la carga pulsatoria máxima dada no se cambie en el proceso del ensayo, está provisto un regulador gracias al cual se mantiene la presión necesaria en el cilindro motor. El regulador de presión (carga) constante está dotado de una válvula de émbolo *11* comunicada con la tubería *10* que va de la bomba *6* al cilindro motor *3*. La válvula está apretada por un resorte especial; su tensado y la velocidad de suministro de aceite por la bomba *6* se regulan de tal manera que, siendo aplicada sobre la probeta la carga máxima, a través de la válvula *11* pase una pequeña cantidad de aceite evacuada al tanque. Si la carga pulsatoria empieza a subir o bajar, la válvula dejará pasar respectivamente mayor o menor cantidad de aceite, manteniéndose constante la presión. Cuando la carga pulsatoria disminuye sensiblemente, la válvula se cierra, se corta la infiltración de aceite y la presión necesaria se restablece con rapidez bajo la influencia de la bomba *6*.

Existe un regulador de carga constante, cuya acción se funda en otro principio. Tal regulador consta de dos electroimanes enlazados con la aguja del medidor de fuerza que marca la carga máxima y con la columna de suministro de aceite del cilindro motor. Cuando la aguja del medidor de fuerza se desvía con respecto al valor dado de la carga máxima, se conecta el electroimán correspondiente. Este, por el intermedio de un sistema de palancas, desplaza la palanca *9* hacia el aumento o la disminución de la velocidad de suministro de aceite, restableciendo así en el cilindro motor la presión necesaria.

El medidor de fuerza permite medir tanto la carga estática como dinámica que actúa sobre la probeta. Para medir la carga estática se abre la válvula *18*; entonces el cilindro *22* del medidor de fuerza se halla comunicado por la tubería de aceite *16* directamente con el cilindro motor *3*. Su presión que surge bajo la acción de la bomba *6* se transmite al cilindro *22* y a través de su émbolo actúa sobre el tirante unido con el péndulo *21*. La relación entre el esfuerzo del tirante y el esfuerzo en la probeta equivale al cuadra-

do de la relación de los diámetros del cilindro *22* y del cilindro motor *3*.

El desplazamiento del tirante provoca la desviación del péndulo *21*, equilibrando así el esfuerzo del tirante. Simultáneamente, proporcional a la proyección horizontal de la desviación del péndulo *21*, es decir, proporcional al esfuerzo del tirante se desplaza la cremallera, arrastrando la aguja que va marcando en la escala circular *19* la carga que ejerce sobre la probeta.

La escala *19* está graduada para tres diferentes límites de medición, según el valor del peso del péndulo *21*. Cuando se cuelga una pesa con la marca *A*, la medición se efectúa en la escala exterior de 0 a 20 tf (el valor de una división es de 50 kgf); con dos pesas colgadas con las marcas *A* y *B*, en la escala intermedia de 0 a 50 tf (el valor de una división es de 100 kgf); con tres pesas con las marcas *A*, *B* y *C*, en la escala interior de 0 a 100 tf (el valor de una división es de 200 kgf).

Al medidor de fuerza también le pertenece un dispositivo para obtener diagramas de dependencia entre la deformación y la carga estática de la probeta. El desplazamiento del agarrador móvil *2*, relacionado con la deformación de la probeta, provoca por el intermedio de las transmisiones por fricción y por engranajes la rotación del tambor situado bajo la escala *19*. El tambor suministra en el sentido vertical la cinta de diagrama, sobre la cual una pluma especial va marcando por la vertical la deformación de la probeta en tamaño natural o dos veces aumentada.

El desplazamiento de la pluma por la horizontal es relacionado con la desviación del péndulo *21* y es proporcional a la carga que actúa sobre la probeta. El desplazamiento máximo de la pluma, cuando actúa una carga límite, es igual a 150 mm. Si la carga es de 1 tf, el desplazamiento de la pluma es de 7,5; 3 ó 1,5 mm de acuerdo con el límite de medición aceptado de 20, 50 ó 100 tf.

Con el fin de evitar que la carga exceda de su límite establecido, en la escala *19* está previsto un contacto que desconecta al motor eléctrico *5* de la bomba de presión tan pronto que la aguja alcance la última división de la escala.

Para poder medir la carga pulsatoria se cierra ante todo, por medio de la válvula *18*, la unión directa del cilindro *3* con el cilindro *22*, y el distribuidor *26* del pulsador se conecta en la tubería de aceite *16*. El núcleo del distribuidor engrana a través de un piñón cónico con el cigüeñal *12* y va girando junto con él. Al estar el cigüeñal en tal posición, cuando el chupón *14* se encuentra en el punto más alto, el distribuidor *26* conecta entre sí las tuberías de aceite *25* y *24* y la presión máxima que surge en ese momento en el cilindro *3* se transmite al cilindro *22*. Dentro de media vuelta del cigüeñal *12*, el chupón pasa en su posición

inferior y el distribuidor *26* se establece de tal manera que las tuberías *25* y *23* se hallan comunicadas. En el cilindro surge la presión mínima que a través del distribuidor y la tubería *23* se transmite al manómetro *20*. Para cualquier otra posición del chupón el distribuidor cierra las tuberías *24* y *23*, manteniendo en ellas una presión constante. Así, pues, en la escala *19* se toma la carga pulsatoria máxima sobre la probeta y en el manómetro *20*, la mínima.

Además de la aguja que marca la carga pulsatoria máxima, el manómetro *20* consta de dos agujas de contacto, con ayuda de las cuales se desconecta el accionamiento de la máquina tan pronto que la desviación del valor dado de la carga mínima alcance una magnitud limitada por las agujas de contacto.

Realización de la prueba. Antes de efectuar el ensayo, la probeta se sujeta en los agarradores correspondientes de la máquina, se pone el límite necesario de medición por medio de los pesos del péndulo *21* y se ajusta la posición nula de la aguja en la escala *19*.

Durante los ensayos estáticos se abre ante todo la válvula *18* para comunicar directamente el cilindro *3* con el cilindro *22* y la válvula *11* del regulador de carga constante se desacopla de la tubería *10*. Luego se conecta el motor *5* y la bomba *6* empieza a suministrar aceite en el cilindro motor *3*. La velocidad de suministro de aceite se regula por medio de la manivela *9* y el volante *8* acorde con la velocidad deseada de crecimiento de la carga sobre la probeta, observando el movimiento de la aguja en la escala *19*.

Una vez que se ha concluido el ensayo ya a causa de la destrucción de la probeta, ya por alcanzar la carga requerida, se desconecta el motor *5* y el aceite del cilindro *3* se evacua al tanque de reserva después de abrir la válvula *7*. El émbolo *4* retorna a su posición inicial y la aguja se para en la división nula de la escala *19*.

Para ensayar la probeta a carga pulsatoria, con la válvula *18* se cierra primeramente la comunicación directa de los cilindros *3* y *22* y, simultáneamente, el distribuidor *26* del pulsador se pone en la tubería *16*. Haciendo girar el volante *15* se levanta la "cola" del mandril *17* hasta que su articulación superior coincida con la articulación de la colisa *13*, lo que corresponde a la posición nula de la aguja unida con el volante *15*. El chupón *14* del pulsador ocupa su posición más elevada.

Después se conectan el motor *5* de la bomba de presión *6* y el motor del pulsador que hace girar el cigüeñal *12* y el distribuidor *26*. La presión en el cilindro motor se aumenta hasta el valor máximo de la carga pulsatoria establecido para dicho ensayo. El chupón *14* se queda inmóvil y no hay pulsación, pero el distri-

buidor *26* enchufa alternativamente ambos manómetros; por eso las agujas de los manómetros máximo *19* y mínimo *20* marcan la carga máxima igual.

Ahora, abriendo la válvula correspondiente, a la tubería *10* se le conecta la válvula *11* del regulador de carga constante. Con el volante *8* se regula la velocidad de suministro de aceite, tensando a la vez el resorte de la válvula *11* de tal manera que, habiendo tenido la carga máxima constante, de ella se infiltre la cantidad máxima de aceite. Luego, por medio del volante *15*, se baja la "cola" 'del mandril *17* y el chupón *14* obtiene la posibilidad de marcha libre hacia abajo desde su posición superior, creando así la carga pulsatoria que actúa sobre la probeta. El chupón sigue bajando hasta que se obtenga el valor deseado de la carga mínima; acto seguido, se establecen, mediante las agujas de contacto del manómetro *20*, los límites estrechos de cambio de la carga mínima, y comienza el proceso del ensayo.

Las agujas de contacto, junto con el regulador de carga constante, limitan la amplitud de la pulsación dentro de los límites dados durante todo el ensayo. Una vez destruida la probeta, la transmisión de la máquina se desconecta automáticamente con ayuda de las agujas de contacto. A la vez se desconecta el contador de pulsaciones enlazado con el cigüeñal *12*.

La magnitud de la pulsación está determinada por la marcha libre del chupón, prevista desde 0 hasta 60 mm. La carga máxima pulsatoria no tiene que exceder de 50 tf.

§ 30. MAQUINA UNIVERSAL CON FUERZA DE HASTA 30 TF CON PULSADOR DE 10 TF DE DOBLE ACCIÓN

La máquina universal con pulsador de acción doble es propia para los ensayos dinámicos y estáticos a tracción o compresión de las probetas de sección redonda o rectangular. También puede efectuarse el ensayo a flexión para las probetas de sección arbitraria. La máquina permite obtener una carga alterna (pulsatoria) de hasta 10 tf y una estática, de hasta 30 tf. Las cargas alternas son engendradas por el pulsador que da 750, 1000, 1500 y 2000 pulsaciones por minuto.

La distancia normal entre los agarradores de la máquina durante los ensayos a tracción o compresión se establece dentro de 0 a 300 mm. Sin embargo, unos dispositivos especiales permiten aumentar esta distancia hasta 500 mm. Existen también unos dispositivos de apoyo para ensayar a flexión probetas con un vano de 500 y 200 mm.

La máquina consta de las siguientes partes principales (fig. 163):

I, bancada con tres cilindros y un dispositivo de apriete;
II, dos excitadores de fuerza con bombas, motores y dispositivos de mando;

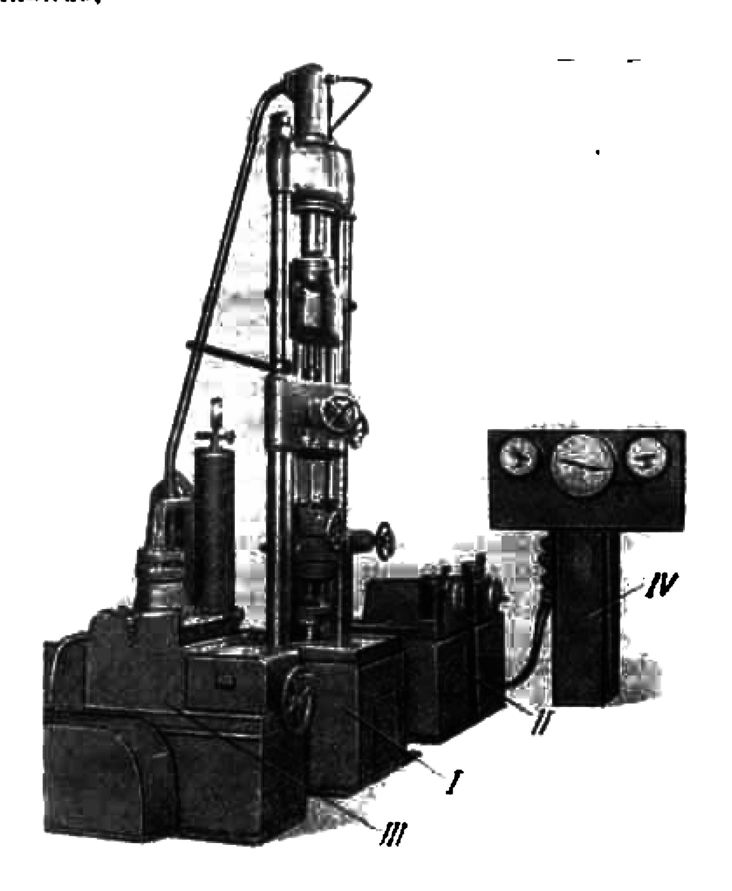


Fig. 163 | Aspecto general de la máquina universal con fuerza de hasta 30 tf con pulsador de 10 tf de doble acción: *I*, bancada; *II*, excitador de fuerza; *III*, pulsador; *IV* medidor de fuerza.

III, pulsador con motor, balón de alta presión y dispositivo de regulación;
IV, medidor de fuerza con péndulo, manómetros y conmutadores.

La bancada tiene una base y dos traviesas, superior y media, unidas por las columnas *8* en un bastidor inmóvil de fuerza (fig. 164). En la base de la bancada y en su traviesa superior están montados dos cilindros motores *5* y *14*. Los émbolos

de esos cilindros se atornillan a los cabezales móviles *6* y *12* unidos entre sí mediante los tirantes *9* que pasan libremente a través de unos agujeros en la traviesa media inmóvil *10*. Los émbolos, cabezales y tirantes forman en general un bastidor de

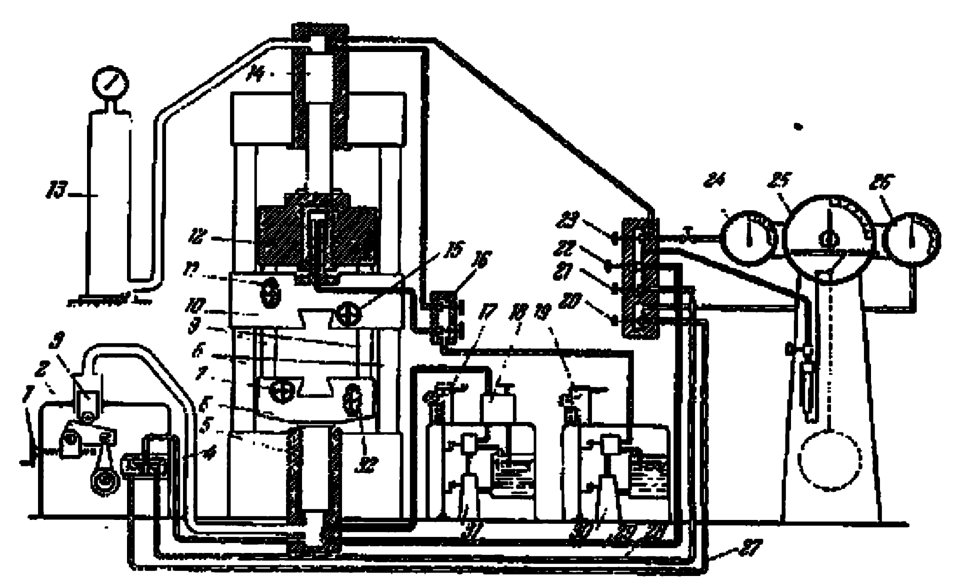


Fig. 164 Esquema de la máquina universal con pulsador de doble acción: *1*, volante del pulsador; *2*, colisa; *3*, émbolo; *4*, distribuidor; *5*, cilindro motor inferior; *6*, cabezal móvil inferior; *7* volante del agarrador de tracción; *8*, columnas; *9*, tirantes; *10*, traviesa inmóvil; *11*, volante del agarrador a compresión; *12*, cabezal móvil superior; *13*, balón para alta presión; *14*, cilindro motor superior; *15*, volante del agarrador de tracción; *16*, conmutador del aceite; *17* y *19*, columnas de mando; *18*, regulador de carga constante; *20*, *21*, *22* y *23*, valvulas del conmutador; *24*, *25* y *26*, manómetros; *27*, *28* y *29*, tuberías de aceite; *30* y *31*, bombas; *32*, volante del agarrador de compresión.

fuerza movido por la vertical por la presión que surge en los cilindros.

La probeta se sujeta mediante los agarradores en el espacio de ensayo comprendido entre la traviesa inmóvil *10* y el cabezal *6* del bastidor móvil de fuerza. Al inyectar aceite en el cilindro motor inferior *5*, dicho bastidor corre hacia arriba y provoca la compresión de la probeta. En cambio, inyectando aceite en el cilindro superior *14*, el bastidor corre hacia abajo y la probeta se tracciona. Si el aceite se suministra simultáneamente en ambos cilindros motores, en la probeta surge un esfuerzo producido por la diferencia de las presiones en los cilindros transmitidas al

bastidor móvil. El pulsador puede cambiar alternativamente la presión en el cilindro inferior *5*, creando con esto la carga pulsatoria que se aplica sobre la probeta.

La traviesa *10* y el cabezal 6 se dotan de unos dispositivos especiales para sujetar las probetas durante la compresión o tracción. Dichos dispositivos constan de varios juegos de diferentes mordazas de apriete para probetas lisas redondas y planas, con hombros y cabezas roscadas al igual que unos apoyos especiales para los ensayos a flexión. La sujeción de las probetas para la tracción en las mordazas de apriete se efectúa mediante los volantes *7* y *15*; la sujeción complementaria para la compresión se hace por medio de los volantes *32* y *11*.

Dentro del cabezal superior *12* está montado un cilindro complementario, cuyo émbolo se apoya contra la traviesa media *10*. Ese cilindro sirve para levantar el cabezal *12* con los tirantes *9*, si se varían las dimensiones del espacio de ensayo.

Dos excitadores de fuerza parejos de la máquina representan bombas de 12 cilindros, accionadas por sendos motores. La bomba *31* del primer excitador de fuerza inyecta aceite en el cilindro motor inferior *5*; la bomba 30 del segundo excitador de fuerza lo inyecta en el cilindro motor superior *14* y en el cilindro complementario situado en el cabezal *12*. La distribución de aceite entre esos cilindros se efectúa mediante el conmutador *16*, cuya válvula superior abre el acceso para el aceite al cilindro *14* y la inferior, al cilindro complementario.

Con el fin de que la presión en el cilindro *5* no varíe en el proceso del ensayo por la infiltración del aceite u otras causas, está previsto el regulador de carga constante *18* situado sobre la caja del primer excitador de fuerza. Cuando funciona la bomba, el regulador *18* aumenta o disminuye automáticamente el suministro de aceite en el cilindro *5* conforme a los menores cambios de presión en él.

La velocidad de suministro de aceite en los cilindros motores se gobierna mediante las manivelas (regulación aproximada) o los volantes (regulación exacta) situados en las columnas de mando iguales *17* y *19* de ambos excitadores de fuerza. En estas mismas columnas están sujetados los interruptores de botón para los motores eléctricos que ponen en acción las bombas respectivas *31* y *30*.

Con el propósito de acelerar el suministro de aceite y aumentar la presión en el cilindro motor, es preciso hacer girar en contra de las manecillas de reloj el disco giratorio *1* (fig. 165) de la columna de mando por medio de la manivela *4* con una empuñadura esférica, tirándola previamente hacia abajo. Si hay necesidad de una regulación exacta de la velocidad de suministro de aceite, el disco se hace girar lentamente con el volante *5*. Las marcas

sobre el disco muestran la velocidad de desplazamiento en mm/min del bastidor móvil de fuerza durante la marcha en vacío. Cuando la marca cero del disco coincide con la aguja *2* sujetada sobre el anillo inmóvil *3*, esto quiere decir que la presión en el cilindro motor no aumenta y la bomba bombea el aceite en el tanque de reserva. Para vaciar el aceite del cilindro es necesario desconectar la bomba, haciendo correr la manivela *4* en el sentido de las manecillas del reloj de tal manera que la marca cero del disco se desplace a la derecha más allá de la aguja inmóvil *2*.

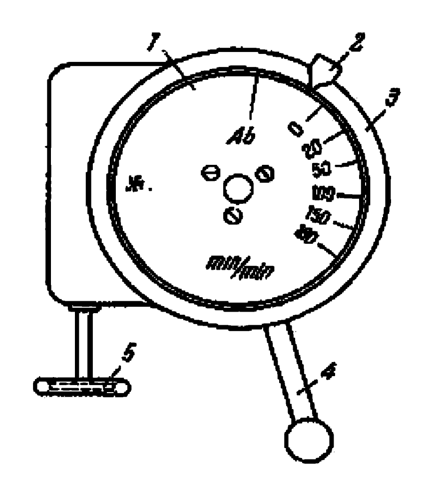


Fig. 165 | Columna de mando de suministro de aceite de la máquina universal con pulsador de doble acción: *1*, disco; *2*, aguja; *3*, anillo inmóvil; *4*, manivela de regulación aproximada; *5*, volante de regulación exacta.

El pulsador es accionado por un motor eléctrico, cuyo interruptor se encuentra en la pared delantera de la caja del pulsador. El motor eléctrico, por el intermedio de un árbol y una biela puesta excéntricamente, hace que la colisa *2* (fig. 164) balancee alrededor de la articulación que la une con la corredera. Esta, al hacer girar el volante *1* y el husillo que pasa dentro, puede correr por la horizontal a una distancia de hasta 240 mm, llevando consigo la colisa *2*.

El émbolo *3* choca con el rodillo contra la arista superior inclinada de la colisa. En su posición inicial señalada con la marca cero en una regleta ubicada a la derecha en la caja del pulsador, el émbolo *3* se apoya contra la colisa encima de la articulación de la corredera y alcanza su punto culminante dentro del cilindro del pulsador. El balanceo de la colisa en esta posición no provoca ningún movimiento del émbolo *3*. El corrimiento de la colisa partiendo de la posición inicial permite al émbolo *3* bajar un poco. Entonces, el balanceo de la colisa provoca la marcha del émbolo hasta el punto culminante, lo que crea la pulsación de la presión en el cilindro motor *5*, comunicado con el cilindro del pulsador por medio de un tubo de sección grande.

El pulsador cambia la presión solamente en el cilindro inferior *5*, mientras que la presión en el cilindro motor superior *14* sigue estando a un nivel determinado constante. Con este fin el cilindro *14* se comunica por medio de otro tubo de sección grande con el balón para alta presión *13*, cuyo contenido como si fuera un resorte que amortigua los cambios de la presión provocada por la deformación de la probeta durante la pulsación.

La frecuencia de la pulsación depende del régimen de trabajo del motor que hace 1500 y 3000 rev/min y está unido con el árbol del pulsador mediante una correa y una polea escalonada con una relación de transmisión de 1/2 y 2/3. La puesta del motor a 1500 rev/min y de la correa en la polea mayor del árbol ofrece 750 pulsaciones por minuto; en la polea menor, 1000 pulsaciones. El cambio del motor a 3000 rev/min ofrece 1500 y 2000 pulsaciones por minuto respectivamente.

El árbol del pulsador hace girar, por el intermedio de una transmisión por engranajes, el distribuidor *4* sincrónicamente con el balanceo de la colisa *2* y el recorrido del émbolo *3*. La presión en el cilindro *5* alcanza el valor máximo dado, cuando el émbolo *3* se encuentra en la posición superior. En ese momento el distribuidor *4* ocupa la posición que abre el acceso de aceite del cilindro *5* al manómetro máximo *25* por la tubería de aceite *28*. Dentro de media vuelta del árbol el émbolo *3* desciende en la posición inferior, como lo permite la colisa para la regulación dada. La presión en el cilindro *5* baja hasta el valor mínimo dado, abriendo el distribuidor *4* el acceso al manómetro mínimo *26* por la tubería de aceite *27*. En todas las posiciones intermedias el distribuidor cierra la comunicación del cilindro *5* con ambos manómetros.

El medidor de fuerza consta de tres manómetros independientes. El manómetro de péndulo *25* se destina para la medición de la presión máxima en el cilindro *5*, cuando la carga es pulsatoria, al igual que las presiones en los cilindros motores *5* ó *14* durante los ensayos estáticos. Los manómetros *26* y *24* sirven solamente para los ensayos dinámicos. Con el manómetro *26* se mide la presión mínima de la carga pulsatoria en el cilindro *5*, con el *24*, la presión solamente en el cilindro superior *14* que durante la pulsación se mantiene constante.

Los manómetros se comunican con los cilindros motores por el intermedio de un conmutador situado en la columna del medidor de fuerza. Para crear la carga pulsatoria se abren las válvulas *20* y *21* del conmutador, cerrando las válvulas *22* y *23* destinadas para los ensayos estáticos. En esta posición del conmutador el cilindro superior *14* se comunica directamente con el manómetro *24*, mientras que el cilindro inferior *5* lo hace a través del distribuidor *4* con los manómetros máximo *25* y mínimo *26*.

Para la tracción estática se abre solamente la válvula *23* y para la compresión, solamente la válvula *22*; las demás tienen que estar cerradas. El manómetro *25* queda comunicado a través de la válvula *23* con el cilindro motor superior *14* y mediante la válvula *22* con el cilindro inferior *5*.

La preparación del ensayo y el arranque de la máquina se efectúan como sigue.

Ensayos dinámicos. La probeta se introduce en el agarrador del cabezal inferior *6* y se la aprieta para la compresión, haciendo girar el volante *7*. Mediante el botón en la columna *17* se conecta el motor de la bomba *31* y, regulando con la manivela de la misma columna el suministro de aceite en el cilindro *5*, se levanta el cabezal *6* para que la probeta dé con el agarrador de la traviesa *10*. Allí la sujetan a tracción con el volante *15*. Después, desconectando la bomba izquierda, se conecta la bomba derecha *30* mediante el botón en la columna *19* con la válvula inferior del conmutador *16* cerrada y la superior abierta; regulando el funcionamiento de la bomba *30* con la manivela y el volante de la columna *19*, se inyecta el aceite en el cilindro superior *14* hasta el valor límite de la fuerza de tracción determinado para dicho ensayo y mostrado por el manómetro *24* con la válvula *23* cerrada. La probeta quedará tensada en las mordazas de apriete; ahora se la sujeta a compresión por medio de los volantes *32* y *11* que traban la probeta por la vertical con cuñas especiales situadas dentro de las mordazas. En consecuencia, se lleva a cabo la total sujeción de la probeta para los ensayos tanto a tracción como a compresión con carga pulsatoria.

Luego, haciendo girar el volante *1* se desplaza la colisa *2* en la posición inicial y se abre la válvula *22*, dejando cerradas las demás válvulas del conmutador; se vuelve a conectar la bomba *31* y se inyecta el aceite en el cilindro inferior *5* hasta el valor límite de la fuerza de compresión determinado para dado ensayo que puede verse en el manómetro *25*.

Las fuerzas límite de tracción y compresión se determinan de tal modo que para cualquier diapasón de pulsación hasta 10 tf la carga sobre los émbolos de los cilindros motores siempre se quede no menor que 5 tf. Se explica esto por la necesidad de suavizar al máximo la influencia de los golpes de la carga pulsatoria y las fuerzas de inercia que surgen a causa de la vibración de una masa relativamente grande del bastidor móvil de fuerza. El hecho de que el diapasón de pulsación se limita con 10 tf quiere decir que si hace falta ensayar la probeta a compresión con el máximo diapasón de pulsación, por ejemplo, con una fuerza de 3 tf, la carga de tracción de la probeta no puede ser mayor que $10 - 3 = 7$ tf. En dicho ejemplo es preciso determinar la fuerza límite que actúa sobre el émbolo del cilindro superior *14* y se mide con

el manómetro *24*; igual a 7 + 5 = 12 tf; la fuerza que actúa sobre el émbolo del cilindro *5* se determina igual a 12 + 3 = 15 tf y se mide con el manómetro *25*. Entonces, en la posición superior del émbolo *3* del pulsador, es decir, cuando la presión en el cilindro inferior es máxima, la probeta estará comprimida con una fuerza igual a 15 — 12 = 3 tf; en la posición inferior del émbolo *3*, es decir, cuando la presión en el mismo cilindro *5* es mínima y en el manómetro *26* no puede ser menor que 5 tf, la probeta estará traccionada por una fuerza igual a 12 — 5 = 7 tf.

Supongamos para otro ejemplo que la probeta tiene que soportar una carga alterna de +2 a —6 tf, es decir, con un diapasón de pulsación de 8 tf. Entonces, la fuerza límite en el manómetro *24* para el émbolo superior será igual a 2 + 5 = 7 tf, para el émbolo inferior en el manómetro *25*, 7 + 6 = 13 t. Durante los ensayos a tracción alterna dentro de los límites de 0 a +10 tf es necesario para ambos émbolos del bastidor móvil de fuerza que las fuerzas límite sean de 15 tf. Durante la compresión alterna dentro de los límites de 0 a 10 tf la fuerza límite para el émbolo superior será igual a 5 tf, para el inferior, 15 tf. Para todos los casos examinados el manómetro mínimo *26* tiene que marcar una carga de 5 tf.

Una vez alcanzadas en los cilindros motores las presiones que corresponden a las fuerzas límite; la correa del motor del pulsador se pone sobre la polea grande o pequeña para obtener la frecuencia elegida de la pulsación; ahora se cierra la válvula *22*, se abren las válvulas inferiores *20* y *21* y se pone en marcha el motor del pulsador por medio de un interruptor situado bajo el volante *1* en la pared delantera de la caja del pulsador. El arranque del pulsador se efectúa obligatoriamente a revoluciones bajas y con la posición inicial de la colisa *2*, cuando su balanceo no provoca todavía la pulsación del émbolo *1*. Es imprescindible para proteger la máquina contra la carga brusca.

Al conectar el pulsador se observa que todos los manómetros marquen magnitudes dadas de las fuerzas, mostrando al principio los manómetros *25* y *26* la fuerza máxima igual. Con este fin se mantiene la presión en los cilindros motores a un nivel constante, regulando a lo largo del ensayo el trabajo ininterrumpido de las bombas de los excitadores de fuerza con ayuda de las columnas de mando *17* y *19*.

En el caso de necesidad se aumenta la velocidad del motor y luego por medio del volante *1* se desplaza la colisa *2*, haciendo con esto en el cilindro motor inferior la disminución alternativa de la presión con respecto a su valor máximo (pulsación). Las indicaciones del manómetro mínimo *26* decrecen paulatinamente de acuerdo con el corrimiento de la colisa hasta el valor de carga mínima determinado para el ensayo, generalmente igual a 5 tf.

Simultáneamente con la rotación del volante *1* se sigue regulando el suministro complementario de aceite por las bombas en los cilindros motores hasta conseguir indicaciones estables en todos los manómetros, luego de lo cual se fija la colisa, evitando los posibles desplazamientos a causa de las sacudidas de la máquina.

Por fin, se enchufa el regulador de carga constante y en los manómetros *24* y *26* se ponen las agujas de contacto limitativas, gracias a las cuales se desconecta automáticamente la transmisión de la máquina, cuando las desviaciones respecto de las cargas determinadas exceden de los límites establecidos. Junto con el pulsador se conecta y se desconecta automáticamente el contador de revoluciones que marca cada 100 pulsaciones; está situado en la pared derecha de la caja del pulsador.

Al haber concluido los ensayos, cuando a causa de la destrucción comenzada de la probeta las cargas disminuyen bruscamente, la transmisión de la máquina se desconecta automáticamente y el contador marca el número de ciclos de carga hasta la destrucción de la probeta.

Ensayos estáticos a tracción. La probeta se sujeta primeramente en el cabezal móvil inferior *6*, su extremo superior se lleva hasta los agarradores de la traviesa *10* y se lo sujeta allí con el volante *15*. Luego se abre la vávula *23* con las demás válvulas cerradas del montante del medidor de fuerza. Oprimiendo el botón en la columna *19* se conecta el motor de la bomba *30* y se realiza la regulación del suministro de aceite en el cilindro motor superior *14* por medio de la manivela y el volante de la columna de mando *19*. La observación sobre la carga de tracción se efectúa solamente por el manómetro de péndulo *25*.

Ensayos estáticos a compresión. La probeta se sujeta primeramente igual que durante el ensayo a tracción; luego con los volantes *32* y *11* se la aprieta para el ensayo a compresión, pero sin tensión preliminar, como se hace para ensayos dinámicos. Luego se abre la válvula *22*, se cierran las demás válvulas del montante con manómetros y se conecta la bomba *31*. El suministro de aceite en el cilindro motor inferior se regula por medio de la columna de mando *17*, observando a la vez en el manómetro *25* el valor de la carga de compresión.

Para realizar los ensayos a flexión el émbolo del cilindro de abajo se separa del cabezal móvil *6* y se los enroscan dos prismas. Sobre la plancha de la base de la máquina se sujetan dos apoyos de doble acción con un vano de 500 mm. La probeta se fija en los apoyos y se traba entre los prismas. Luego se efectúa el ensayo a flexión con carga alterna en la misma secuencia que durante la tracción y compresión.

§ 31 MARTINETE PENDULAR PARA ENSAYO POR IMPACTO DE PROBETAS RANURADAS

Para determinar la resiliencia de los metales se utilizan ampliamente los martinetes pendulares. Se fabrican con diferentes límites del cambio de la energía gastada para romper la probeta durante el impacto. Durante el ensayo de probetas estándar, de acuerdo con el GOST 9454-60, se utilizan martinetes pendulares con una reserva de energía no mayor que 30 kgm, porque un exceso grande de energía que se queda después del impacto influye negativamente sobre la precisión de la medición. Para obtener resultados comparables de los ensayos es necesario tener una reserva de energía que garantice una velocidad de movimiento del péndulo para el momento de impacto dentro de los límites de 4 a 7 m/s. Generalmente se utilizan martinetes que tienen los límites de medición de la energía de 0,5; 5; 15 y 30 kgm. Para muchos martinetes la reserva de energía puede variarse escalonadamente dentro de la potencia dada de acuerdo con la viscosidad del material de la probeta. Existen martinetes con una potencia de hasta 250 kgm para el ensayo por impacto de probetas especiales.

El martinete pendular (fig. 166) consta de una bancada de fundición *6* hecha en forma de una losa maciza de cimiento con dos columnas verticales, un péndulo *2* y un dispositivo de medición.

Arriba, sobre las columnas de la bancada se sitúa el eje horizontal *4* que gira libremente entre cojinetes de bolas. Sobre este eje, en el espacio por entre las columnas, está puesto el péndulo *2* que consta de una barra de suspensión y un martillo pesado que parece un disco plano. El martillo tiene una profunda ranura, cuyo fondo tiene sujetado el cuchillo *1* de acero templado que es el punzón del péndulo. La arista de choque del cuchillo coincide exactamente con la recta que pasa por el centro del eje *4* y el centro de gravedad del martinete. Cuando el aparato no funciona, el péndulo cuelga libremente, siendo estrictamente vertical la línea que va uniendo su centro de gravedad con el centro del eje *4*.

Abajo, al nivel del cuchillo del péndulo vertical, dos apoyos de acero templado *7* con juntas recambiables de diferente espesor se atornillan a las columnas de la bancada. Dichos apoyos son móviles, lo que permite, cambiando las juntas, poner la distancia necesaria entre los apoyos (vano de la probeta) al igual que la altura de los asientos de apoyo conforme con las dimensiones de las probetas a ensayar.

Debajo de los apoyos *7*, entre las columnas, pasa una correa de freno *8* sujetada sobre la losa de cimentación de la bancada.

Al tensar la correa con la manivela *9*, se aprieta en la parte inferior contra el péndulo que balancea después del choque y, provocando el frenado, lo para paulatinamente.

El dispositivo de medición del martinete representa un sector inmóvil *10* sujetado sobre una de las columnas de la bancada concéntricamente con el eje *4* del péndulo. El sector tiene una

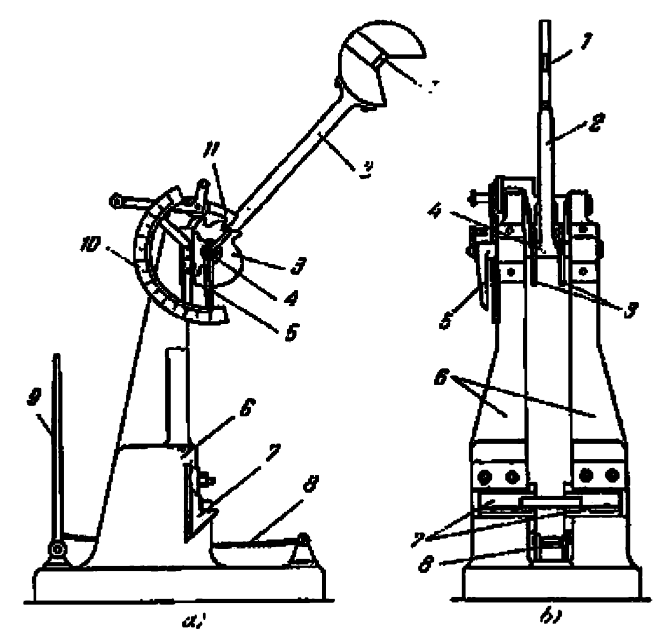


Fig. 166 | Esquema de un martinete pendular: *a*, elevación; *b*, vista lateral; *1*, punzón (cuchillo); *2*, péndulo; *3*, disco dentado; *4*, eje del péndulo; *5*, aguja; *6*, bancada; *7*, apoyos; *8*, correa de freno; *9*, manivela; *10* sector inmóvil; *11*, seguro.

escala graduada en grados o unidades de trabajo. La aguja *5* del dispositivo de medición está puesta fuertemente sobre el eje *4*, por lo cual gira junto con el eje y el péndulo.

Antes de empezar el ensayo, el péndulo se levanta a la altura original y se detiene en la posición alzada por medio de un seguro especial *11*. Los martinetes con la reserva variable de energía se dotan de un disco dentado *3* puesto sobre el eje *4* y enlazado rígidamente con la barra de suspensión del péndulo. En este caso, engranando el seguro con correspondientes dientes del disco, se puede levantar el péndulo a diferente altura original. Luego sobre los apoyos *7* se sitúa libremente, sin sujeción, la probeta ranurada. La ranura se orienta en el sentido del impacto y justamente

por el centro de los apoyos con el fin de que el golpe del cuchillo del péndulo dé en la arista de la probeta opuesta a la ranura. Para una colocación rápida y exacta de la probeta sobre los apoyos se debe hacer uso de patrones especiales.

La altura de los asientos de apoyo que se pone una vez para una serie de ensayos de probetas del mismo tamaño, se elige de tal manera que el eje medio de la probeta se encuentre al nivel de la mitad del cuchillo (centro del impacto) en el instante de la posición vertical del péndulo.

Después de haber levantado el péndulo en la posición original y colocado la probeta sobre los apoyos, con el fin de efectuar el impacto se ejerce presión sobre la manivela del seguro *11* y el péndulo se libera del engranaje. Cayendo libremente, éste pasa por la posición más baja, golpea la probeta, la destruye y luego sube a cierta altura.

La determinación de los ángulos de elevación del péndulo después del golpe se realiza por medio de un dispositivo de medición. Los martinetes que tienen la aguja *5* puesta sobre el eje de rotación móvil del péndulo, tienen un tope inmóvil arriba cerca de la división cero de la escala de medición del sector *10*. Durante el movimiento del péndulo desde la posición original hasta el final de la elevación, ya después del golpe la aguja *5* se aprieta contra ese tope y se mantiene inmóvil en la división cero de la escala. Durante el retorno del péndulo (desde el punto más alto del vuelo hacia abajo), la aguja, a causa de la fricción, se mueve junto con el péndulo. Tras unas cuantas oscilaciones, éste se para en la posición vertical y la aguja ha de indicar la división de la escala que corresponde al ángulo de elevación. Las divisiones numéricas de la escala de medición de tales martinetes aumentan desde arriba hacia abajo.

Algunos martinetes tienen la aguja puesta sobre el eje inmóvil concéntricamente con el eje de rotación del péndulo. Entonces el tope para la aguja se pone sobre el "dedo" enlazado con el eje giratorio del péndulo; cuando éste está en la posición vertical, el tope detiene la aguja en la división cero de la escala. Durante la caída y el siguiente vuelo del péndulo, el tope empuja la aguja, dejándola en la división que corresponde al ángulo de elevación. En este caso las divisiones numéricas de la escala van creciendo desde abajo hacia arriba.

Para reducir la flecha de la barra de suspensión y la vibración dañina del péndulo después del golpe, se hace la distancia l (fig. 167) desde el centro del eje de rotación del péndulo hasta el centro del golpe O un poco mayor de la distancia l_1 desde el mismo eje hasta el centro de gravedad C del péndulo. Al centro del golpe le corresponde el llamado peso P del péndulo reducido a ese punto; se determina partiendo de la condición de equilibrio

del péndulo en la posición horizontal y tiene que satisfacer la igualdad $Pl = Ql_1$, siendo Q el peso verdadero del péndulo.

Cuando en los apoyos falta la probeta, el péndulo que cae libremente desde la altura original H, pasa entre los apoyos y se eleva a una altura H_1. Por gastar una cantidad insignificante de energía para vencer las resistencias parásitas, la altura H_1 del vuelo será un poco menor que la original H. Prescindiendo del

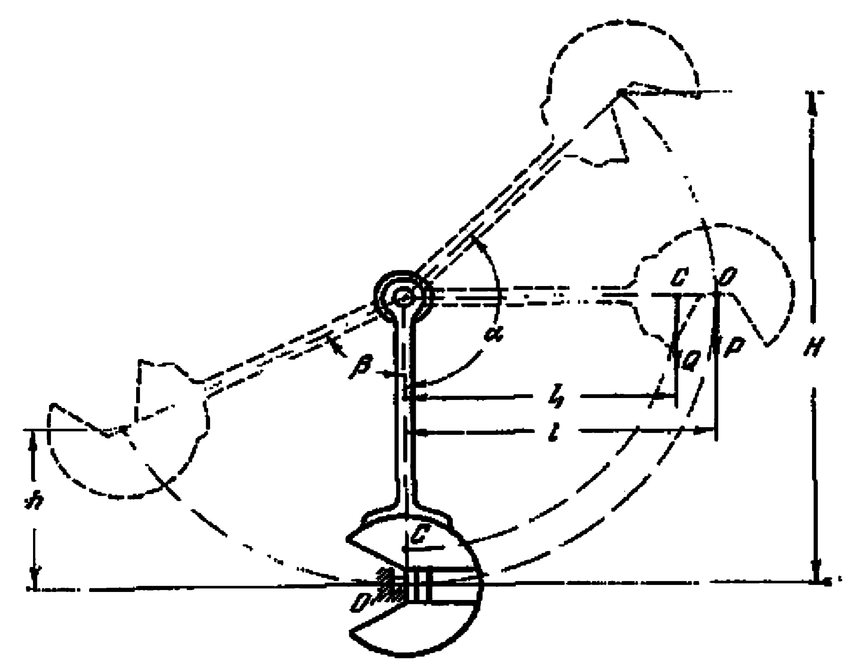


Fig. 167 | Esquema de funcionamiento del martinete pendular.

valor pequeño de las pérdidas dañinas de la fuerza viva del péndulo se puede aceptar $H_1 = H$.

Cuando en su trayectoria el péndulo choca con la probeta, éste la rompe, si la fuerza del golpe es suficiente, y se eleva a la altura h. La cantidad de energía gastada para romper la probeta, cuando los centros C y O coinciden, es

$$A = P(H - h), \tag{90}$$

donde A es el trabajo gastado para la rotura igual a la resiliencia absoluta.

Expresemos la altura original H (si se quiere calcular con más precisión, es la altura de la elevación del péndulo durante la marcha en vacío) por la longitud l y el ángulo de elevación α (fig. 152):

$$H = l + l \operatorname{sen}(\alpha - 90^\circ) = l(1 - \cos\alpha).$$

Designando por β el ángulo de vuelo del péndulo después del golpe, hallamos por analogía:

$$h = l - l\cos\beta = l(1 - \cos\beta).$$

Teniendo en cuenta los valores hallados de H y h, obtenemos la resiliencia absoluta en forma de

$$A = Pl(\cos\beta - \cos\alpha). \tag{91}$$

La fórmula (91) es válida también para el caso cuando el centro del golpe O no coincide con el centro de gravedad C del

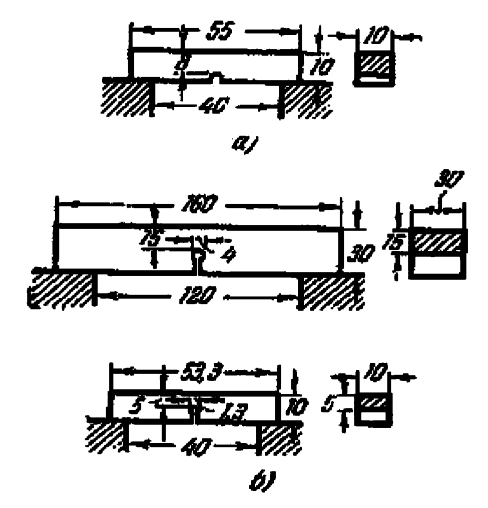


Fig. 168 | Probetas para los ensayos a resiliencia: *a*, probeta estándar principal; *b* probetas mayor y menor con ranura profunda.

péndulo. De la dependencia entre el peso reducido P y el verdadero Q se desprende lo siguiente:

$$A = Ql_1(\cos\beta - \cos\alpha).$$

De acuerdo con el GOST 9454-60 la resiliencia es

$$a = \frac{A}{F}\ \text{kgm/cm}^2, \tag{92}$$

donde F es el área de la sección de la probeta en el plano de la ranura. Para facilitar los cálculos se hace uso de tablas especiales que ofrecen los valores de la resiliencia según las magnitudes medidas de los ángulos α y β.

A veces sobre la escala de medición se ponen las divisiones no en grados, sino en unidades de trabajo. Entonces, designando por A_0 y A_1 las lecturas en la escala durante la marcha vacía y

el golpe, respectivamente, la resiliencia se determinará por la fórmula

$$a=\frac{A_0-A_1}{F}. \tag{93}$$

Según el GOST 9454-60, las probetas deben tener dimensiones estándar y una ranura determinada para cada probeta. La probeta estándar principal para el ensayo de resiliencia debe tener las dimensiones señaladas en la fig. 168, *a*. Para algunos ensayos se utilizan también probetas mayor y menor con una ranura profunda (fig. 168, *b*).

Los martinetes pendulares pueden utilizarse también para los ensayos a rotura por impacto. Para estos fines los martinetes se dotan de unos topes salientes especiales que se fijan a la bancada con pernos en vez de los apoyos. En el hueco roscado en el dorso del martillo se enrosca una cabeza de la probeta, generalmente redonda. En otra cabeza se enrosca una traviesa ligera, pero lo suficientemente rígida. El martillo se eleva en la posición original junto con la probeta. Al caer el péndulo, en el momento de pasar por la vertical, la traviesa choca contra los topes salientes y así sucede la rotura de la probeta por impacto.

§ 32. MAQUINA UNIVERSAL CON FUERZA DE HASTA 10 TF CON MEDIDOR DE FUERZA ELECTRONICO Y DISPOSITIVO DE CALENTAMIENTO

La universalidad de la máquina examinada del tipo УМЭ-10Т (UME-10tf)[1]) consiste no sólo en la posibilidad de realizar con ellas los ensayos de probetas metálicas y plásticas a tracción, compresión o flexión, siendo aplicada la carga estática, sino, principalmente, en poder efectuar cargas cíclicas con cualquier coeficiente de asimetría del ciclo con deformaciones o cargas dadas dentro de los límites de su capacidad de carga de +10 a —10 tf. La mayor frecuencia de la carga cíclica de la máquina es de 10 ciclos por minuto. Además, todas esas cargas pueden aplicarse tanto en las condiciones de temperatura normal como en las de elevación de la temperatura de la probeta hasta 1200 °C. En fin, la máquina tiene un medidor de fuerza y aparato de diagramas electrónicos que da una posibilidad de registrar a gran escala la curva del esfuerzo en función de la deformación de la probeta.

La fig. 169 representa esquemáticamente el aspecto general de la máquina. La base *1*, enlazada inmóvilmente con el cimiento, las columnas *2* y el cabezal superior inmóvil *3* forman un bastidor rígido de la máquina de ensayo. Al cabezal superior se sujeta una

---

[1]) La fábrica de máquinas de ensayo de Armavir produce dichas máquinas en serie.

articulación elástica y el dinamómetro *4*, formando un conjunto. Directamente al dinamómetro se sujetan los agarradores superiores de recambio según el tipo de las probetas y el carácter de los ensayos. Unos agarradores análogos se sujetan en la articulación elástica inferior unida al cabezal móvil inferior *5*.

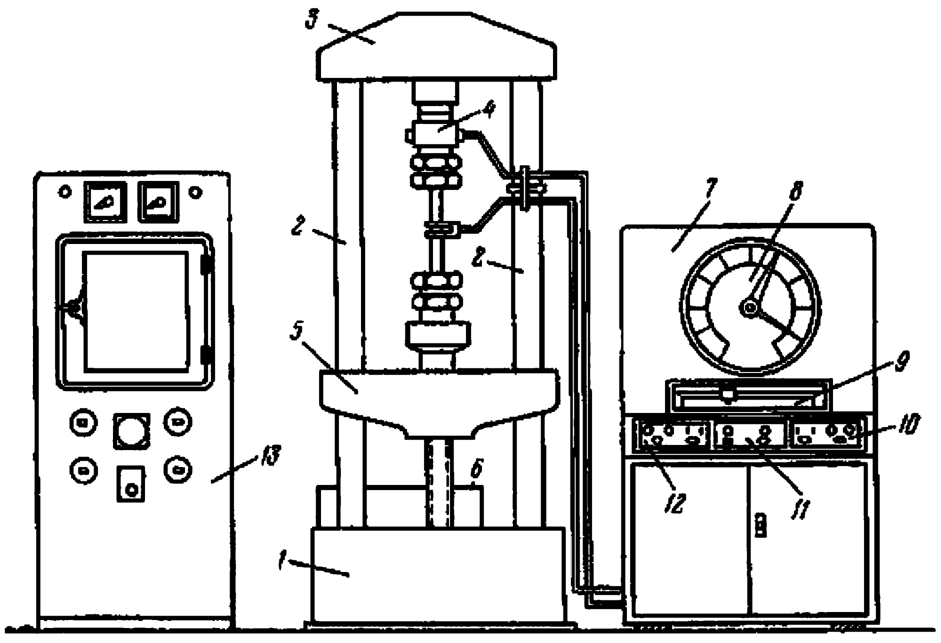


Fig. 169 Esquema de la máquina universal con fuerza de 10 tf con medidor de fuerza electrónico y calentador: *1*, base; *2*, columnas; *3*, cabezal inmóvil; *4*, dinamómetro; *5*, cabezal móvil; *6*, caja de velocidades; *7*, tablero de mando; *8*, medidor de fuerza; *9*, aparato de diagramas; *10*, canal de fuerza; *11*, dispositivos de contacto; *12*, canal de deformación; *13*, calentador.

La máquina está dotada de un juego de agarradores para los ensayos de probetas metálicas y plásticas redondas y planas tanto en las condiciones normales como en las de temperaturas elevadas. En el último caso sobre unos agarradores especiales de la probeta se monta un horno radiante, con cuya ayuda la probeta se calienta hasta la temperatura determinada. Con el fin de aumentar la estabilidad del sistema situado entre los cabezales superior e inferior, formado por los agarradores y la probeta, las articulaciones elásticas superior e inferior se reemplazan, durante los ensayos a compresión o a carga alternativa, por un acoplamiento rígido, poniendo casquillos esmerilados. Para efectuar el ensayo a flexión al cabezal *5* se sujeta, en vez de la articulación

elástica inferior, una mesa especial sobre la cual se montan probetas que se ensayan a flexión.

Las dimensiones máximas de la máquina permiten obtener una distancia entre los agarradores (longitud de la probeta) igual a 900 mm para los ensayos a temperatura ambiente y 400 mm a temperatura elevada. La distancia entre los apoyos durante los ensayos a flexión puede variar dentro de 100 a 700 mm.

Detrás de la máquina está unida a la base la caja de velocidades *6* con motor eléctrico que garantiza diez velocidades de traslado del agarrador móvil en un diapasón de 0,005 a 100 mm/min.

Al lado de la máquina está situado el tablero de mando *7*. Este tiene montado el medidor de fuerza electrónico con la esfera *8*, el aparato de diagramas *9* del tipo de tambor, el contador del número de ciclos, los aparatos electrónicos y de accionamiento eléctrico y los órganos de mando de la máquina que contienen el canal de la fuerza *10*, los dispositivos de contacto *11* y el canal de deformación *12*.

El medidor de fuerza tiene tres escalas de carga con diferente valor de una división tanto para los ensayos estáticos como para los cíclicos. Las escalas *A*, *Б* y *В* sirven para la medición de las cargas estáticas límite de 2, 5 y 10 tf y tienen el valor de una división de 4, 10 y 20 kgf respectivamente (el cero de la esfera se ubica a la izquierda). Las cargas cíclicas límite en estas escalas (el cero de la esfera en el medio) varían dentro de los límites de ± 2, ± 5 y ± 10 tf respectivamente, con el valor de una división de 8, 20 y 40 kgf. Esto permite elegir una precisión de las mediciones más grande.

Las deformaciones en el aparato de diagramas pueden obtenerse en las siguientes escalas: 1000 : 1, 500 : 1, 200 : 1, 100 : 1. La dimensión máxima del diagrama obtenido de la fuerza en función de la deformación es de 500 $\times$ 500 mm.

La máquina УМЭ-10Т (UME-10 tf) tiene el dispositivo de calentamiento *13* hecho en forma de un adaptador especial a la máquina. Puede adaptarse, en un principio, a otra máquina de ensayo. Al dispositivo de calentamiento le pertenece el horno radiante, el termostato y el armario de mando. El horno radiante se monta directamente sobre la probeta por medio de unos agarradores especiales. Los calentadores del horno aumentan la temperatura del aire en el espacio alrededor de la probeta situada dentro, calentándola de esta manera. La temperatura máxima del calentamiento de probetas metálicas por el horno radiante es de 1200 °C. El termostato es propio para el calentamiento de probetas plásticas. Su temperatura máxima alcanza hasta 400 °C.

La alimentación de los calentadores de energía eléctrica, así como el agua para el enfriamiento del horno, los agarradores y

los extensómetros se suministran de la columna de distribución. El armario de mando del calentamiento contiene el potenciómetro ЭПП-09 (EPP-09) y sirve para mantener la temperatura dada de la probeta, su regulación y registro. En la fig. 170 puede verse una foto del aspecto general de la máquina.

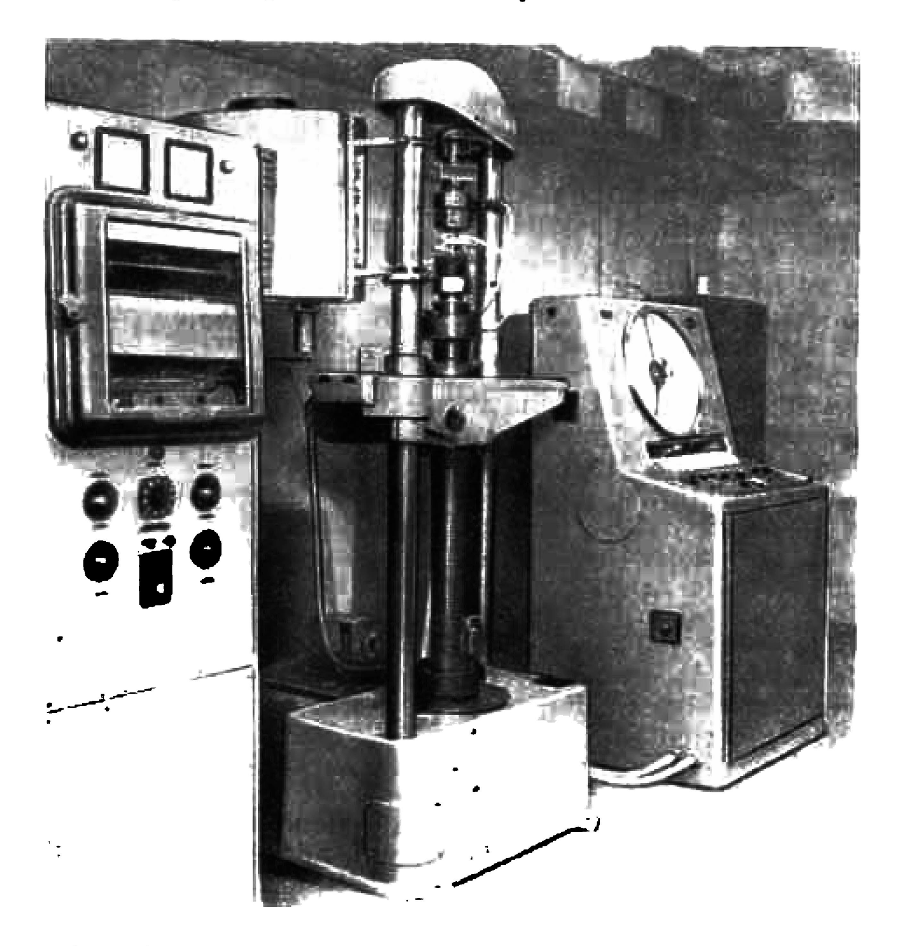


Fig. 170 | Aspecto general de la máquina universal УМЭ-10Т (UME-10 tl).

El esquema cinemático de la máquina se muestra en la fig. 171. La carga que se aplica durante el ensayo a la probeta *2*, actúa sobre el dinamómetro *1* sujetado inmóvilmente en el cabezal superior de la máquina por medio de una articulación elástica. El dinamómetro representa un cilindro elástico hueco con captadores de resistencia óhmica de laminilla pegados, los cuales son brazos

de trabajo de los puentes de medición (véase la fig. 104). El dinamómetro sirve para medir la fuerza que surge en la probeta en cualquier momento del ensayo.

La medición de las deformaciones longitudinales de la probeta se efectúa por el intermedio de los extensómetros eléctricos des-

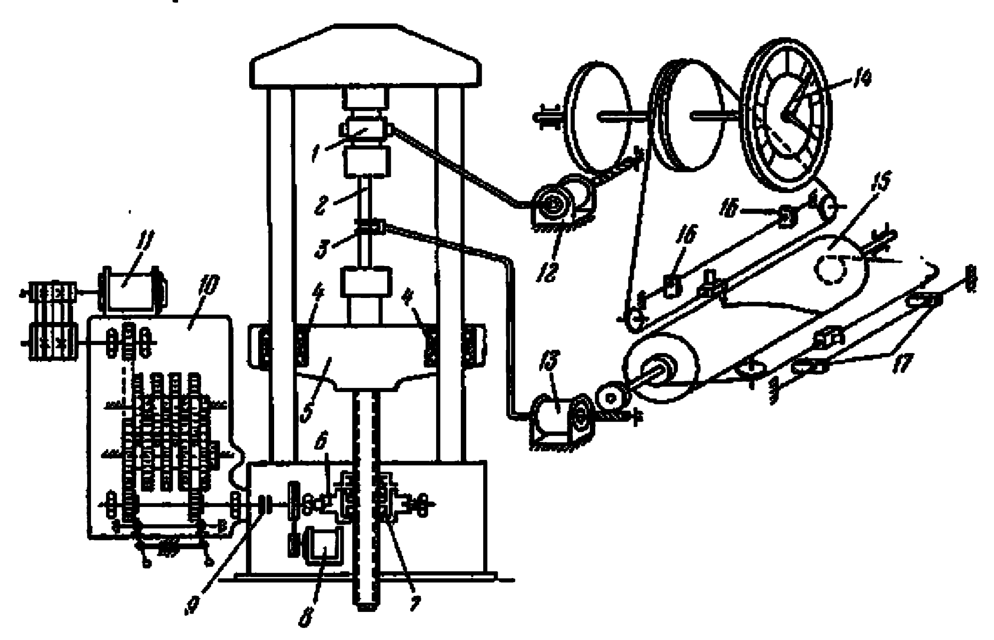


Fig. 171 | Esquema cinemático de la máquina universal УМЭ-10Т (UME-10 tf): *1*, dinamómetro; *2*, probeta; *3*, extensómetro; *4*, casquillos guía; *5*, cabezal móvil; *6*, reductor de tornillo sin fin; *7*, tuerca partida; *8*, motor de colocasión; *9*, embrague; *10*, caja de velocidades; *11*, motor de la transmisión; *12*, motor del medidor de fuerza; *13*, motor del tambor; *14*, esfera; *15*, tambor; *16* y *17*, interruptores.

montables *3* colocados directamente sobre la parte de trabajo de la probeta. El extensómetro eléctrico representa una abrazadera elástica con captadores de resistencia de laminilla pegados encima, análogos a los del dinamómetro *1*. La base del extensómetro puede variar de 0,1 a 50 mm. La base de medición elegida se fija con tornillos especiales antes de situar el extensómetro sobre la probeta.

La carga sobre la probeta *2* se transmite de su agarrador inferior sujetado en el cabezal *5* que tiene la posibilidad de movimiento libre estrictamente a lo largo de las columnas de la máquina, lo que está garantizado por los casquillos guía *4* con bolas montadas dentro.

El cabezal *5* obtiene el movimiento de avance por medio de un husillo de carga accionado por el reductor de tornillo sin fin *6* ubicado dentro de la base de la máquina. Para crear carga cíclica alternativa es imprescindible garantizar la transmisión de la carga sin juegos. Esto se logra mediante la sujeción rígida de la probeta en los agarradores especiales y poniendo en la rueda del reductor *6* la tuerca partida *7* destinada para la eliminación previa de los juegos en el acoplamiento entre el reductor de tornillo sin fin y el husillo de trabajo.

El motor eléctrico *8* situado dentro de la base de la máquina hace girar el reductor de tornillo sin fin, si hace falta levantar o bajar libremente el cabezal *5*, y sirve solamente para los fines de colocación.

El giro de trabajo del reductor de tornillo sin fin y, por consiguiente, la carga de la probeta, se efectúa por medio de un motor eléctrico asincrónico *11* de transmisión de dos velocidades, montado sobre la caja de velocidades *10* y conectado desde el tablero de mando. La caja de velocidades se une rígidamente a la base de la máquina y garantiza las siguientes relaciones entre los números de revoluciones de su eje secundario y primario: 1 : 1, 1 : 10, 1 : 100, 1 : 1000, 1 : 10 000. El motor eléctrico se enlaza con el reductor de tornillo sin fin por el intermedio de la caja de velocidades mediante el embrague magnetoeléctrico *9*. Gracias a todo esto pueden obtenerse diez velocidades posibles de traslación del agarrador móvil (velocidades de carga de la probeta) en un diapasón de 0,005 a 100 mm/min.

Al proceder a la carga de la probeta, los elementos elásticos del dinamómetro *1* y el extensómetro *3* se deforman, lo que provoca desequilibrios de los puentes de medición. Las señales de desequilibrio se amplifican y se aplican a la entrada de los motores eléctricos asincrónicos de reversión dirigidos *12* y *13* que están situados en el tablero de mando. El motor eléctrico *12* acciona, por medio de un reductor correspondiente, la aguja de la esfera *14* del medidor de fuerza y la pluma del tambor *15* del aparato de diagramas. La pluma por medio de un hilo se traslada a lo largo de la generatriz del tambor proporcionalmente a la fuerza que actúa sobre la probeta. Simultáneamente el motor eléctrico *13* que obtiene una señal del extensómetro *3*, hace girar el tambor *15*, por el intermedio de su reductor, alrededor de su eje, a causa del cual la pluma traza por la circunferencia del tambor, perpendicular a su generatriz, un segmento proporcional a la deformación longitudinal de la probeta. Así, pues, se obtiene sobre el papel tendido sobre el tambor la curva de la fuerza en función de la deformación de la probeta en una escala correspondiente.

Con el fin de obtener cargas alternativas (cíclicas) se previó la posibilidad de reversión del motor eléctrico de transmisión *11*. Con este propósito están instalados paralelamente al eje del tambor del aparato de diagramas los interruptores terminales sin contactos *16* y *17*. Los interruptores *16* limitan el traslado de la pluma a lo largo de la generatriz del tambor *15* y mandan órdenes al inversor del motor *11* tan pronto como la pluma alcance el interruptor, estableciendo los límites dados de la carga cíclica. De la misma manera los interruptores *17* limitan el giro del tambor alrededor de su eje y van manteniendo los límites dados de la carga cíclica. Si se quiere, se puede realizar la reversión del motor de transmisión por cargas o deformaciones dentro de cualesquiera límites de capacidad de la máquina.

La medición eléctrica de la carga y la deformación de la probeta se funda en el método de compensación. En calidad de los transformadores de la deformación medida en los canales de fuerza y deformación se emplean extensómetros constantes de laminilla que forman un puente completo. Los potenciómetros, conectados en uno de los circuitos simétricos paralelos del puente de compensación, sirven de patrón variable (compensador) en ambos canales. Los puentes de medición y compensación se alimentan de corriente alterna de 4—5 V de tensión en la frecuencia portadora de alrededor de 1000 Hz para eliminar la influencia de posibles interferencias. Con el fin de garantizar la constancia del cero en todos los diapasones de mediciones y para alcanzar su alta precisión durante los ensayos cíclicos duraderos, se utilizó el esquema de conexión paralela de los puentes de medición y compensación, al igual que la autonomía de su equilibrado por la fase y la amplitud. El error de medición de la carga, merced a esto, no sobrepasa de $\pm 1\%$ del valor medido y el error de inscripción de la carga y la deformación, $\pm 2\%$.

En resumen, la máquina permite realizar, obteniendo diagramas de deformación, lo siguiente:

1) ensayos estáticos hasta la destrucción de probetas metálicas o plásticas con diferente velocidad de carga;

2) ensayos cíclicos hasta la destrucción con la amplitud de carga o deformación constante, pero con un número pequeño (hasta 10) de ciclos por minuto;

3) ensayos de arrastre o relajación, siendo estrictamente constante la carga o la deformación.

CAPITULO XI

Máquinas para ensayos a temperaturas altas y bajas

§ 33. MAQUINA DE ENSAYO DE 30 TF CON CALENTADOR DE HASTA 1200°

La máquina es propia para los ensayos de metales a tracción o compresión a temperaturas de hasta +1200°. Tanto el dispositivo de apriete de la máquina como los tirantes se fabrican de acero pirorresistente. La máquina permite crear las siguientes cargas máximas de acuerdo con la temperatura de calentamiento:

30	tf	para	la	temperatura	de	hasta	700°
18	»	»	»	»	»	»	800°
9	»	»	»	»	»	»	900°
6	»	»	»	»	»	»	1000°
4	»	»	»	»	»	»	1100°
2	»	»	»	»	»	»	1200°

La máquina consta de las siguientes partes principales (fig. 172):

I, bancada con sujetadores;

II, excitador de fuerza hidráulico con bomba, motor y dispositivo de mando;

III, medidor de fuerza pendular con aparato de diagramas;

IV, horno de alta temperatura con dispositivos de calentamiento y regulación;

V, armario de regulación con instrumentos de distribución y control.

La bancada (fig. 173) representa un bastidor hecho de perfiles canal, formado por montantes con traviesas inmóviles superior e inferior. En la traviesa inferior del bastidor está sujetado un husillo enlazado rígidamente con los tirantes inferiores *1*, los cuales, igual que los tirantes superiores *4*, pasan libremente a través de los agujeros de los cabezales móviles potentes *2* y *3*. Se puede enlazar los tirantes mediante arandelas cilíndricas con el cabezal inferior *2* o el superior *3*. Las arandelas están situadas arriba y abajo del cabezal y constan cada una de dos semicilindros unidos con pernos.

La distancia entre los sujetadores para probetas o planchas de apoyo instaladas en los cabezales *2* y *3*, puede variar dentro de 0 a 500 mm desplazando el husillo mediante un motor ubicado en la parte inferior de la bancada. El motor se conecta por medio

del botón superior del interruptor *6* para mover el husillo hacia arriba y con el inferior, hacia abajo; el intermedio sirve para la parada.

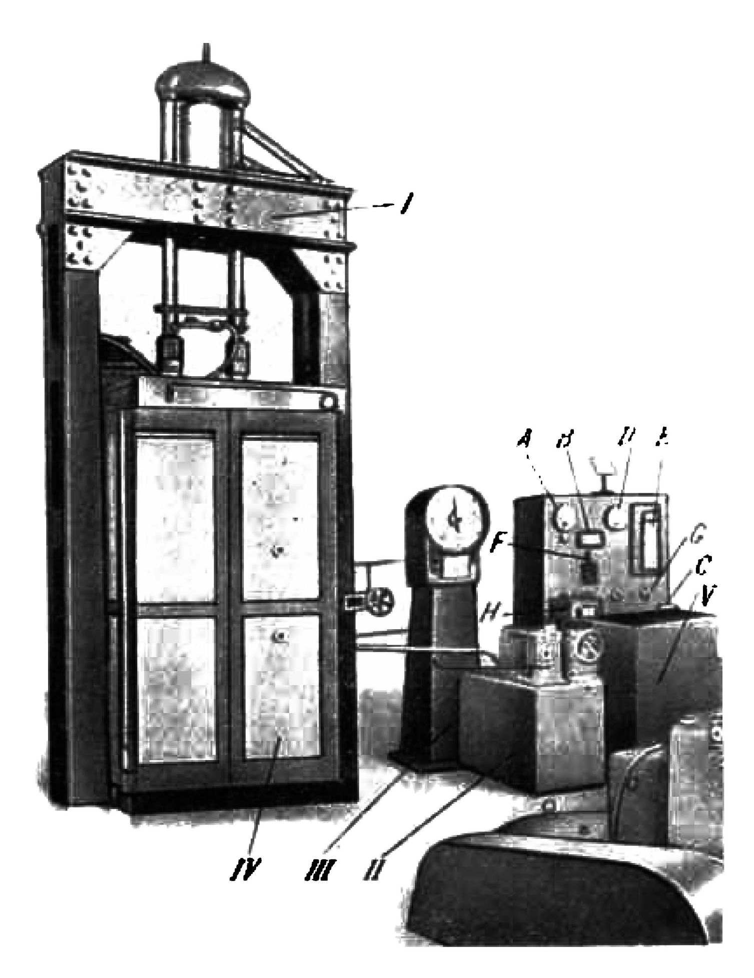


Fig. 172 | Aspecto general de la máquina de ensayo de 30 tf con calentador de hasta 1200°: *I*, bancada; *II*, excitador de fuerza hidráulico; *III*, medidor de fuerza pendular; *IV*, horno de alta temperatura; *V*, armario de regulación.

Sobre la traviesa superior del bastidor descansa el cilindro motor *5* con chupón que porta el cabezal móvil, el que tiene sujetados los tirantes superiores *4*. Al inyectar aceite en el cilindro motor, el chupón levanta esos tirantes hacia arriba. Si se los empalma con el cabezal superior *3* y los tirantes inferiores *1*

con el cabezal inferior *2*, entonces la probeta fijada en los sujetadores entre los cabezales experimentará tracción. Para los ensayos a compresión hay que unir los tirantes superiores *4* con el cabezal inferior *2* y los inferiores *1*, con el superior *3*.

El excitador de fuerza de acción hidráulica posee la bomba *8* con motor y el montante *7* del dispositivo de regulación con una manivela para la regulación aproximada y un volante, para la

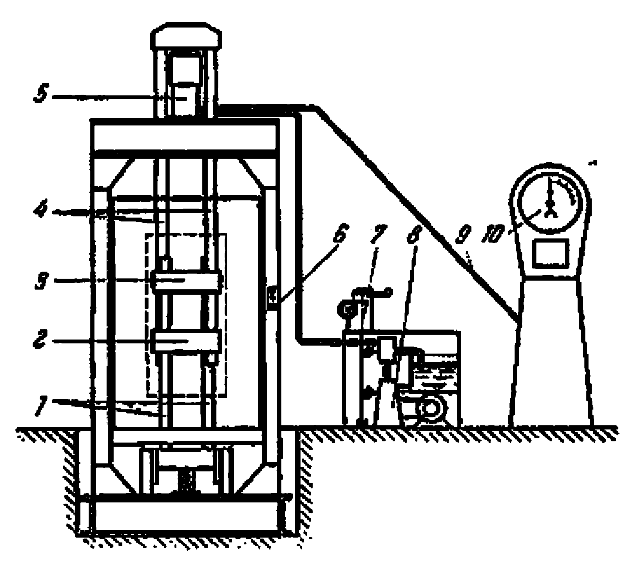


Fig. 173 | **Bancada, excitador de fuerza y medidor de fuerza de la máquina de 30 tf con calentador: *1*, tirantes inferiores; *2* y *3*, cabezales; *4*, tirantes superiores; *5*, cilindro motor; *6*, interruptor; *7*, montante de mando; *8*, bomba; *9*, tubería de aceite; *10*, escala del medidor de fuerza.**

exacta. La bomba *8* alimenta el cilindro motor *5* de aceite, lo que engendra esfuerzo en la probeta. Para poner en marcha la bomba *8* es necesario conectar su motor, oprimiendo el botón superior del interruptor fijado sobre el montante *7*. Si la marca cero del disco del montante de mando se encuentra contra la aguja, la bomba mantiene en el cilindro *5* una presión constante; haciendo correr la manivela del montante de mando *7* junto con el disco a la izquierda (en contra de las manecillas del reloj) se aumenta la alimentación de aceite, a causa de lo cual el chupón del cilindro *5* sube. Las marcas sobre el disco a la derecha del cero indican la velocidad de levantamiento del chupón en mm/min. Durante el movimiento de la manivela a la derecha más allá de la marca cero, se abre la válvula de vaciado y el aceite se va saliendo del cilindro *5* al tanque de aceite. Las mismas operaciones, pero a

ritmo lento, se efectúan con ayuda del volante del montante de mando 7. Oprimiendo el botón inferior del interruptor situado sobre el montante, se desconecta el motor de la bomba.

El medidor de fuerza pendular permite medir el esfuerzo en la probeta en tres escalas *10* con diferente valor de una división, según el valor del peso suspendido del péndulo, a saber:

con el peso *A*	en la escala	0— 5000 kgf	con el valor de una división de 10 kgf
» » » *A* + *B*	» » »	0—15 000 kgf	con el valor de una división de 25 kgf
» » » *A* + *B* + *C*	» » »	0—30 000 kgf	con el valor de una división de 100 kgf

La escala horizontal del diagrama que corresponde a estas tres combinaciones de cargas es igual a 33,3; 100 o 200 kgf por 1 mm.

El principio del funcionamiento del medidor de fuerza consiste en que la presión en el cilindro *5*, proporcional al esfuerzo de la probeta, se transmite por la tubería *9* al émbolo del cilindro del medidor de fuerza. Este, por medio de un tirante, hace desviar la varilla del péndulo; la proyección horizontal del desplazamiento del peso del péndulo es proporcional a la presión en el cilindro *5*. El otro extremo de la varilla empuja la cremallera que hace girar una rueda dentada con la aguja de la escala *10*, y desplaza por la horizontal la pluma del aparato de diagramas. Esta va trazando en la cinta de diagramas unos segmentos proporcionles a la magnitud de la fuerza. La pluma fija en la cinta por la vertical la deformación de la probeta en la escala 1 : 1 ó 1 : 2. Esto sucede a causa de la traslación de la cinta por un rodillo unido mediante engranajes, un eje en forma de una barra y la cremallera con el movimiento del chupón del cilindro motor *5* determinado por la deformación de la probeta.

El horno de alta temperatura *IV* (véase la fig. 172) se sitúa entre los montantes de la bancada sobre unas vigas horizontales colocadas al nivel del suelo independientemente del bastidor de la bancada. El horno representa un armario de temperatura con aislamiento térmico espeso de cerámica. Dentro del horno (fig. 174) se encuentra la cámara de ensayos *I* con las siguientes dimensiones: 510 × 510 mm en planta y 1400 mm de altura. En el techo y el suelo de la cámara la cerámica tiene agujeros a través de los cuales pasan los tirantes superiores e inferiores del husillo y el cilindro motor de la bancada. Los extremos de los

tirantes se empalman dentro de la cámara con unos cabezales con dispositivos de sujeción. Dentro de los tirantes superiores hay agujeros taladrados longitudinales; éstos terminan sobre el horno en forma de agujeros de entrada y salida con mangueras conectadas. Poniéndolas en la red de aguas corrientes se crea en los agujeros longitudinales una circulación de agua que enfría los tirantes superiores.

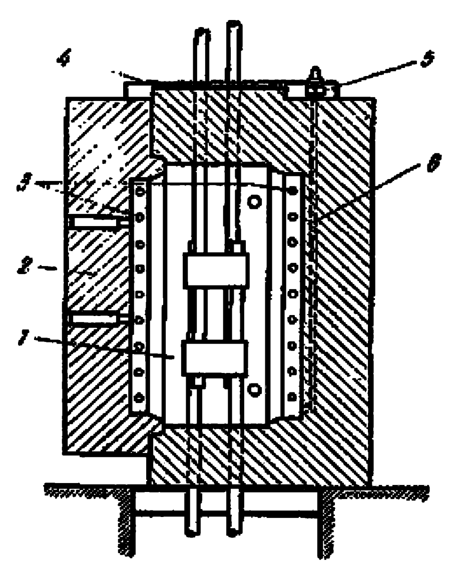


Fig. 174 | Corte de un horno de alta temperatura: *1*, cámara de ensayos; *2*, puerta; *3*, barras de calentamiento; *4*, capota; *5*, ventilador; *6*, ranuras.

El horno se cierra por medio de una maciza puerta *2* con aislamiento térmico de cerámica y dos ventanillas de observación con cristales de cuarzo. El calentamiento del horno es producido mediante unas barras especiales *3* de 14 mm de diámetro y 250 mm de longitud hechos de silicio al carbono. En las cavidades de la parte interior de la pared de atrás de la cámara de ensayo, uniformemente por la altura del horno, se ubican sendas nueve barras de calentamiento *3*. Los bornes de salida de las barras de la puerta, al cerrar la puerta *2*, se conectan debajo de la empuñadura de cierre. Allí mismo está previsto un interruptor automático que corta la corriente en todo el circuito de calentamiento al abrir la puerta. El borne de salida común de todas las barras de calentamiento va hacia el conmutador principal situado en el tablero del armario de regulación.

Dos termómetros (termopares) que se encuentran a diferente altura dentro de la cámara en los agujeros de la pared lateral

izquierda, sirven para medir la temperatura en el proceso del ensayo. El alambrado de los termómetros sale afuera y se conecta con termorregulador en el armario de regulación.

La igual temperatura en toda la cámara se logra gracias a la circulación forzada del aire realizada por el ventilador *5*. El aire calentado que se infiltra del horno se reúne bajo la capota *4* y a través de las ranuras *6* hechas en la pared trasera del horno se inyecta por el ventilador en la parte inferior de la cámara. Allí el aire calentado se mezcla y se infiltra parcialmente por el techo de nuevo bajo la capota. La intensidad de circulación del aire se regula por medio de una válvula especial.

Dentro del armario de regulación se encuentra el equipo eléctrico necesario para la explotación del horno; es propio para garantizar lo siguiente: 1) regulación automática de la temperatura y su control; 2) registro ininterrumpido de la temperatura; 3) control continuo de la corriente y tensión; 4) corrección del gasto de energía relacionado con el "envejecimiento" de las barras de calentamiento.

Para efectuar el ensayo, la probeta se fija en los aprietes de la máquina, se cierra la puerta del horno, conectando el sistema de calentamiento en el circuito, y se conecta el conmutador principal *C* (véase la fig. 172). Con esto se enchufan el amperímetro *A* y el voltímetro *D*, dando señales unas bombillas de color ubicadas abajo. Por el intermedio de una llave especial la aguja roja del termorregulador se pone en la temperatura dada en la escala *B* y haciendo girar el volante *G* se conecta el conmutador escalonado, según la temperatura establecida y el tiempo del calentamiento. Luego se pone en marcha, por medio del interruptor *F*, el motor del ventilador, se abre la válvula de la tubería de agua para que el agua de enfriamiento circule en los agujeros taladrados de los tirantes superiores y se acciona el aparato de diagramas *E* para el registro de la temperatura en función del tiempo.

Cuando el horno se caliente hasta 100°, se pone la regulación automática mediante el interruptor *H*.

Para que la probeta como si se acostumbrara a la temperatura dada, se mantiene durante 1 ó 2 horas sin carga, solamente después de esto se procede al ensayo. Con este fin se pone en movimiento la bomba *8* (fig. 173), se regula mediante la manivela o el volante del montante *7* el suministro de aceite en el cilindro motor *5* y se observa el crecimiento de la carga en la escala *10* de acuerdo con el límite de medición establecido.

Se permite abrir la puerta del horno a una temperatura no mayor que 900°. Por eso, al acabar el ensayo, es necesario aguardar cierto tiempo para que la temperatura baje.

§ 34. MAQUINA CON FUERZA DE HASTA 30 TF PARA ENSAYOS A TEMPERATURAS DE —60° A +100°

La máquina es propia para los ensayos de metales a tracción o compresión a temperaturas de —60° a +100°. Consta de las siguientes partes principales (fig. 175):

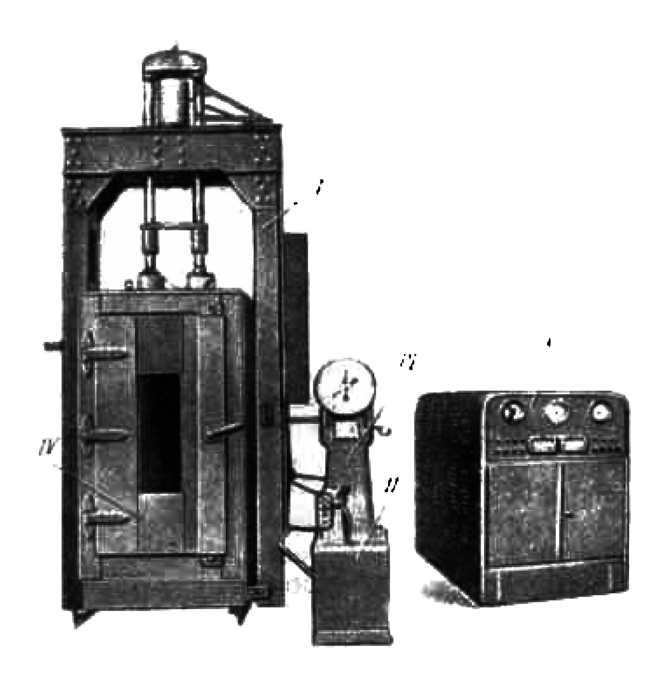


Fig. 175 Máquina con fuerza de hasta 30 tf para ensayos a temperaturas de —60° a +100°: *I*, bancada con aprietes; *II*, excitador de fuerza hidráulico; *III*, medidor pendular de fuerza; *IV* armario de temperatura; *V*, refrigerador.

I, bancada con aprietes;

II, excitador de fuerza hidráulico;

III, medidor pendular de fuerza;

IV, armario de temperatura con cámara de ensayo y dispositivos de enfriamiento y calentamiento montados dentro de éste;

V, equipo de refrigeración con instrumentos de regulación y control.

La composición general y la estructura de la bancada, del excitador de fuerza y del medidor de fuerza son iguales que las de la máquina examinada en el § 33 (véase la fig. 173), por eso

se dan a continuación solamente los dispositivos relacionados con el calentamientro y enfriamiento de la probeta.

El armario de temperatura tiene unas paredes macizas hechas de material calorífugo; se encuentra dentro de una cubierta de metal. En la fig. 176 se muestra el corte del armario por el plano de simetría. En la parte delantera se encuentra la cámara de ensayo *3*, mientras que en la de atrás los serpentines *5* del vapori-

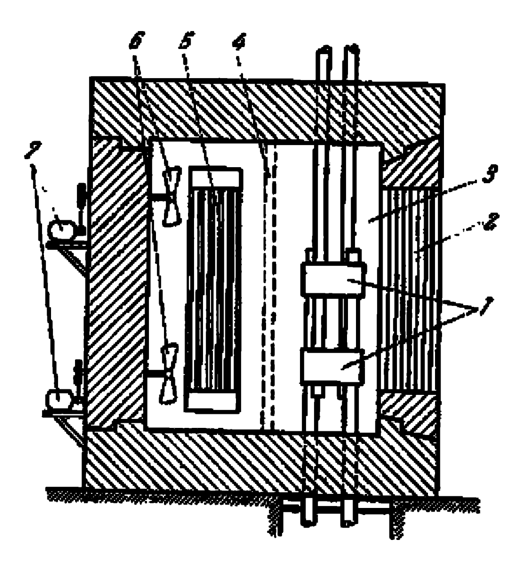


Fig. 176 | Corte del armario de temperatura de la máquina de ensayo a temperaturas de —60° a + 100°: *1*, dispositivos de apriete; *2*, puerta; *3*, cámara de ensayo; *4*, espirales de calentamiento; *5*, serpentines del vaporizador; *6*, ventiladores; *7*, motores.

zador del equipo de refrigeración. Entre los serpentines y la cámara de ensayo son montadas las espirales de calentamiento *4*. Detrás de los serpentines a diferentes niveles hay dos ventiladores *6* accionados por los motores *7*. Los ventiladores remueven el aire dentro del armario para que en todos los rincones de la cámara de ensayo la temperatura sea igual. Para brindar más comodidad al montaje de las instalaciones interiores del armario, su pared trasera es desarmable. La puerta *2* del armario tiene siete capas de cristal con capas intermedias de aire, lo que permite observar la probeta durante el proceso del ensayo sin empeorar la calidad del aislamiento térmico.

Dentro de la cámara de ensayo, a través de los agujeros en el suelo y el techo, pasan los tirantes de la bancada con los dispositivos de apriete *1* sujetados a ellos.

El equipo de refrigeración de la máquina (fig. 177) consta de dos compresores: de baja presión *1* y de alta presión *4*, accionados por los motores eléctricos *3*. El compresor *1* de baja presión chupa por el intermedio del hervidor *7* el gas frigorígeno (freón) del evaporador situado en el armario de temperatura y lo inyecta, a través del condensador *2* enfriado con agua, en el compresor *4* de alta presión. En el compresor *4* sucede la condensación del gas

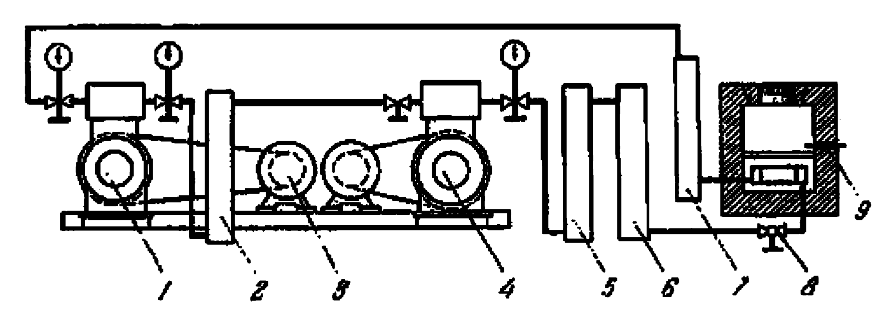


Fig. 177 | Esquema del refrigerador de la máquina de ensayo a temperaturas de —60° a 100°: *1*, compresor de baja presión; *2* condensador; *3*, motores eléctricos; *4*, compresor de alta presión; *5*, condensador; *6*, enfriador; *7*, hervidor; *8*, válvula; *9*, termómetro.

frigorígeno hasta una presión más alta. De allí el gas condensado pasa por el segundo condensador *5* enfriado con agua, luego por el enfriador intermedio *6* y llega a la válvula de regulación *8* de alta presión con flotante. De la válvula *8* el gas penetra de nuevo en el evaporador dentro del armario de temperatura. Allí se evaporiza, quita el calor al aire ambiente, bajando así la temperatura dentro del armario. La llegada del gas en el evaporador y, por consiguiente, la intensidad de su evaporación se regulan mediante la válvula *8*. Esta se abre por medio de un termorregulador especial relacionado con el termómetro *9* y el dispositivo para la medición de la fuerza. La regulación de la válvula *8* es automática, mas, cuando la temperatura en la cámara de ensayo alcanza el valor puesto en el termorregulador, cesa su cambio siguiente y la temperatura se mantiene constante durante todo el ensayo.

CAPITULO XII

Instalaciones de laboratorio de mesa

§ 35. INSTALACIONES PARA ENSAYOS A FLEXION

En la fig. 178 puede verse una instalación de mesa [1]) para los ensayos a flexión pura. Consta de dos vigas de acero de doble te № 12 de 1,5 m de longitud. La viga inferior *1* hace las veces de la bancada. A ella están soldados dos montantes, sobre los

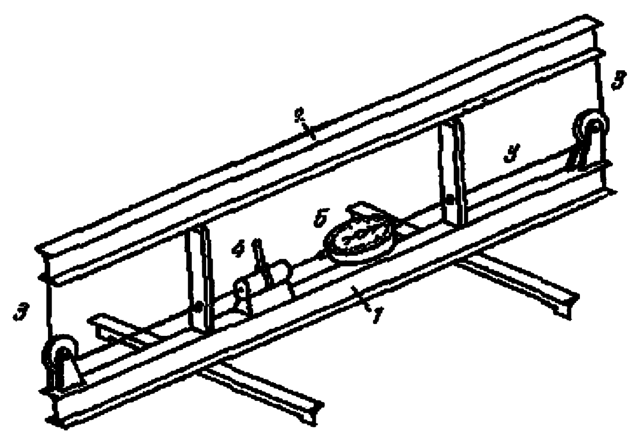


Fig. 178 | Instalación de mesa para ensayos a flexión pura de la viga: *1*, bancada; *2*, viga ensayada; *3*, cable; *4*, manguito tensor; *5*, dinamómetro.

cuales descansa la viga ensayada *2*. Los cables de carga *3* están sujetados a los extremos de la viga; dichos cables pasan por las poleas fijadas en la bancada y se empalman con el manguito tensor *4*. La fuerza de tensión de los cables se mide con el dinamómetro *5*. La viga en su parte media se somete a flexión pura; allí se sitúan extensómetros, flexímetros e inclinómetros.

En la fig. 179 se representa una instalación de mesa de cantilever (también para los ensayos a flexión). La viga remachada *1* de doble te se empalma inmóvilmente por un extremo con la viga maciza *2* que forma un conjunto con la bancada rígida *3* que descansa sobre la mesa. La longitud del cantilever es de 80 cm, la altura, 14 cm; el material es dural. Por medio de la palanca *4* el cantilever se carga en su extremo libre con una fuerza dirigida hacia abajo. La carga se aplica a mano, colocando pesas en el

[1]) Propuesta por V. F. Minéev.

extremo de la palanca (se muestra con el punteado). Mediante la palanca *5* la viga se carga con una fuerza dirigida hacia arriba. Si las fuerzas son iguales, el tramo *BC* de la viga ha de experimentar flexión pura. Variando la cantidad de las pesas sobre las palancas se puede aplicar diferentes cargas sobre la viga. Si es necesario aumentar la longitud de la palanca *5*, entonces puede moverse para otro lado, el apoyo de la palanca puede desplazarse por la ranura a lo largo de la bancada *3*.

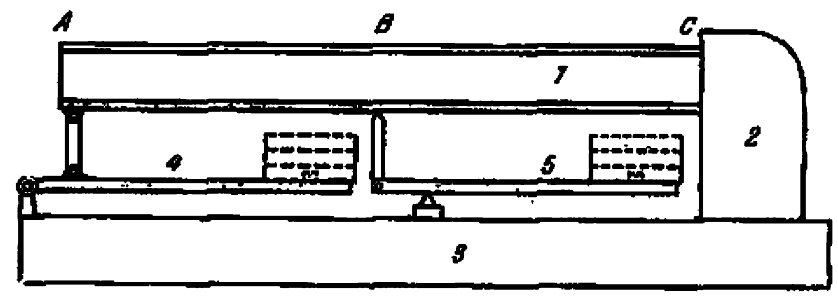


Fig. 179 Instalación de mesa para el ensayo de la viga a flexión: *1*, viga de doble te ensayada; *2*, viga maciza; *3*, bancada; *4* y *5*, palancas para cargar la viga.

§ 36. INSTALACION PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA COMPUESTA

La instalación en cuestión[1]) es propia para el ensayo de tubos en las condiciones de carga compuesta y permite crear en las paredes del tubo ensayado estado de tensión plano, siendo cualquiera la relación entre las tensiones. La instalación (fig. 180) consta de una pieza maciza de fundición *1*, cuya pared vertical lleva sujetado rígidamente, por medio de una brida, el tubo de duraluminio *2*. La plancha de acero *3* está sujetada en la posición vertical al extremo libre del tubo en el plano de la sección de tope. De los extremos de la plancha cuelgan los platillos *4* dedicados para los pesos; el cablecillo del platillo izquierdo pasa por la polea inmóvil *5* fijada en un montante especial por encima de la plancha. Al cargar los platillos, sobre el extremo izquierdo de la plancha va a ejercer una fuerza dirigida hacia arriba, sobre el derecho, hacia abajo. Así, pues, si sobre ambos platillos se colocan iguales pesos, en el tubo surgirán solamente momentos de torsión; si los pesos son diferentes, van a surgir además momentos flectores. Variando los valores de los pesos y de sus brazos, es fácil obtener cualesquier relaciones entre los momentos de flexión y torsión y, por consiguiente, entre las tensiones en las secciones del tubo.

---

[1]) Propuesta y realizada por N. A. Fomin.

Las pequeñas dimensiones de la instalación permiten situarla sobre una mesa corriente. La solidez de la pieza *1* y su estabilidad ofrecen la posibilidad de realizar una sujeción rígida del tubo ensayado.

Para medir las deformaciones del tubo se emplean extensómetros eléctricos de resistencia. Con este fin se pega a la superficie exterior del tubo una roseta (véase la fig. 61 en la pág. 114) de tres captadores de resistencia de hilo con una base de 20 mm; dos de ellos, D_x y D_y, son mutuamente perpendiculares, el tercero, D_u, se pega orientado a 45° con respecto a los primeros dos. Cada

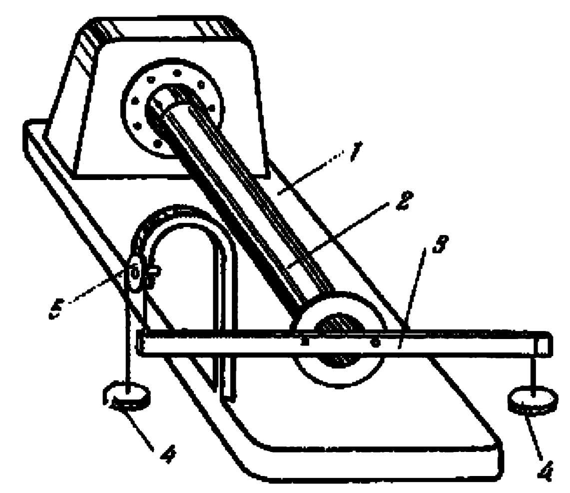


Fig. 180 | Instalación para el ensayo de resistencia compuesta: *1*, pieza de fundición; *2*, tubo de duraluminio; *3*, plancha; *4*, platillos para los pesos; *5*, polea inmóvil.

uno de los captadores se conecta en el puente con los captadores de compensación K_x, K_y, K_u independientes (fig. 181). Estos están pegados a unas chapas cantilever de duraluminio. Por medio de un tornillo micrométrico se dan diferentes flechas a la chapa, alargando con esto las fibras de su superficie exterior, lo que ocasiona el cambio de la resistencia del captador de compensación y se logra el equilibrado del puente. Sin embargo, los incrementos de los alargamientos de las fibras del tubo pueden determinarse con el puente desequilibrado.

La conexión de cada captador en el circuito eléctrico se efectúa mediante un conmutador especial. El puente de medición se alimenta de corriente con una tensión de 5,1 V de una batería de acumuladores.

El cambio de la resistencia del captador, proporcional a la deformación medida, se determina por medio de un galvanómetro de espejo portátil.

Al quebrantarse el equilibrado del puente, la corriente pasa por la bobina *1* del galvanómetro (fig. 182, *a*), suspendida en el campo magnetoeléctrico de un hilo elástico *2*, y ocasiona el giro

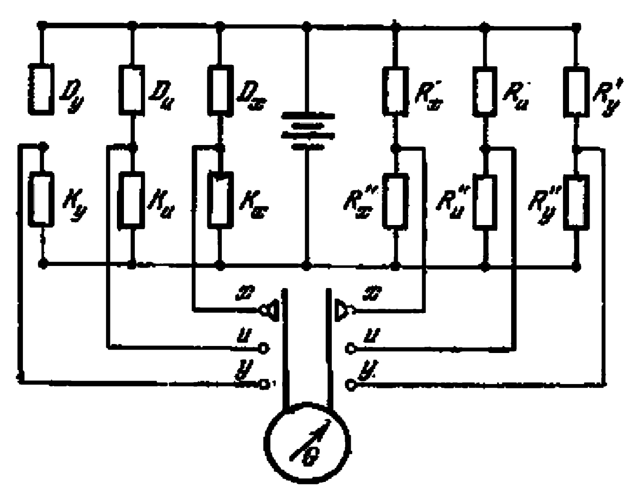


Fig. 181 | Esquema del puente de medición de la roseta de captadores.

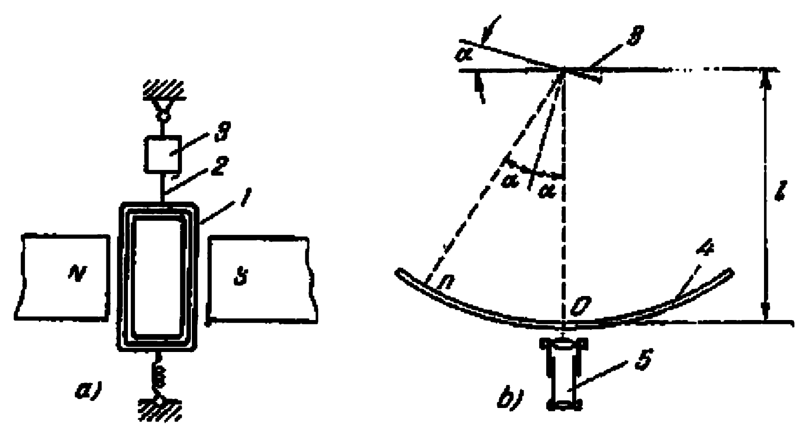


Fig. 182 | Esquema de un galvanómetro de espejo portátil: *a*, bobina y espejo; *b*, escala y anteojo; *1*, bobina; *2*, hilo elástico; *3*, menudo espejo; *4*, escala; *5*, anteojo.

de la bobina alrededor del eje vertical. A la bobina se sujeta un menudo espejo *3*, en el cual se refleja la escala *4* del galvanómetro (fig. 182, *b*) observada a través del anteojo *5*. Una de las marcas de la escala se hace coincidir con la raya vertical en el objetivo del anteojo. Si la bobina junto con el espejo se desvía a

un ángulo α proporcional a la deformación del material en el punto donde está pegado el captador, la raya se desplaza hasta una marca que dista n divisiones desde la marca inicial. El valor de una división de la escala depende de la intensidad de la corriente, la resistencia de los conductores y el galvanómetro y de la distancia entre el espejo y la escala. El valor de una división puede determinarse experimentalmente para cada galvanómetro por separado. Los galvanómetros portátiles utilizados en la instalación dada tienen la escala con el valor de una división de $0{,}2\cdot10^{-5}$ a $0{,}4\cdot10^{-5}$.

Para un trabajo normal del dispositivo de medición eléctrica es imprescindible que tanto el campo electromagnético como la tensión en la red eléctrica sean estables. Durante el ensayo el puente de medición tiene que encontrarse bajo corriente; por tal razón es necesario siempre tener conectado cualquiera de los tres captadores, cambiándolos cuando sea necesario.

§ 37. INSTALACIONES PARA ENSAYOS AL PANDEO

1. Instalación para ensayar barras apoyadas articuladamente. En la fig. 183, *a* se muestra la instalación de ensayo al pandeo de probetas apoyadas articuladamente de una longitud considerable (hasta 2 m) por una fuerza de compresión de hasta 50 kgf. La probeta *1* con su extremo superior choca contra el apoyo inmóvil *A*, y su extremo inferior se sostiene por el cilindro *2* que se apoya sobre el resorte *3*. El cilindro se mueve libremente dentro del vaso *4*. El tornillo *5* que se enrosca en el vaso por abajo, comprime el resorte, transmitiendo éste el esfuerzo sobre la probeta. El resorte es calibrado, y a base de su deformación puede tenerse una idea sobre la magnitud de la fuerza axial que se aplica a la probeta.

Para las probetas más potentes que corresponden a una carga de 50 a 600 kgf en vez del resorte se utiliza un dispositivo de palanca mostrado en la fig. 183, *b*.

2. Instalación de ensayo de barra empotrada. La instalación para el ensayo al pandeo de una barra empotrada por un extremo puede verse en la fig. 184. Las piezas de sujeción *1*, unidas con tuercas de orejas *2*, aprietan fuertemente el extremo inferior de la probeta *3*. Ésta, junto con las piezas de sujeción, se sitúa sobre la mesita inmóvil *4*. El tornillo elevador *5* sirve para poner la probeta en la posición estrictamente vertical.

El extremo superior libre de la probeta se carga mediante el balancín y los tirantes, como se muestra en la fig. 184, con el peso Q que ejerce a lo largo del eje de la probeta. La carga se efectúa directamente con pesas.

Al alcanzar carga crítica, la barra empieza a inclinarse hacia un lado. Con el fin de evitar las deformaciones plásticas de la barra se montan los topes *6*, sobre los cuales se apoya ésta después de haber perdido la estabilidad.

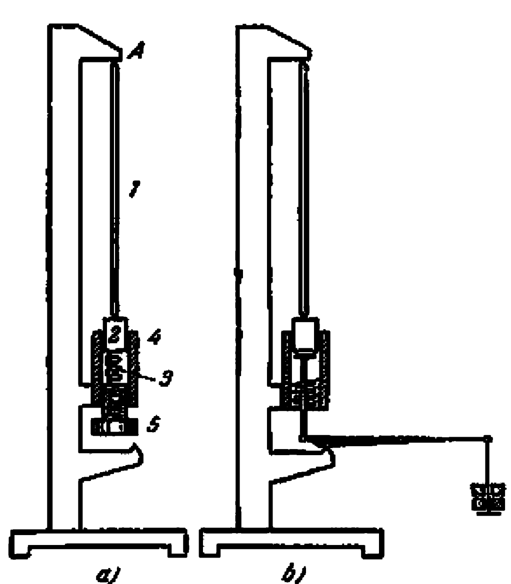


Fig. 183 | Esquema de una instalación para el ensayo de probetas largas a pandeo: *a*, por medio del tornillo *5*; *b*, por medio de carga directa.

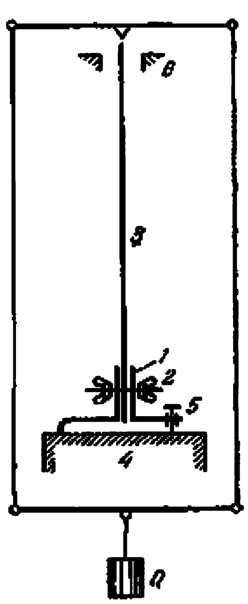


Fig. 184 | Esquema del ensayo a pandeo de una barra larga empotrada por un extremo: *1*, piezas de sujeción: *2*, tuerca de orejas del tornillo de apriete; *3*, probeta; *4*, base inmóvil; *5*, tornillo de ajuste; *6*, topes que limitan la inclinación de la probeta después de haber perdido el equilibrio.

El ensayo se realiza con probetas de mucha flexibilidad. En el caso de una probeta rígida es difícil efectuar el empotramiento del extremo inferior de la probeta.

§ 38 INSTALACION PARA EL ENSAYO DE UNA PLANCHA A FLEXION

En la fig. 185 puede verse el corte de una prensa hibráulica de construcción más simple predestinada para el ensayo a flexión de una plancha redonda con extremos empotrados, aplicando

carga uniforme. El cilindro motor 1 se cubre con la plancha ensayada 2, cuyos bordes se aprietan por la tapa 3 enroscada por arriba sobre el cuello del cilindro. Dentro del cilindro a través del agujero 4 en su fondo se inyecta aceite mediante una bomba de mano. Las flechas de la plancha se miden a través de una abertura en la tapa 3. Los indicadores (véase el § 2) que están sujetados a la tapa se apoyan con sus pernos de medición contra la superficie superior de la plancha y, al levantarse ésta hacia arriba, marcan su flecha.

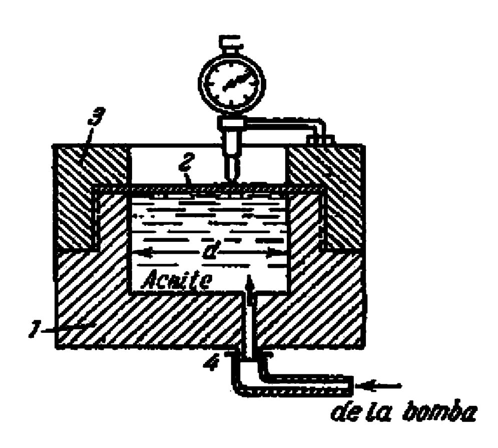


Fig. 185 | Esquema de una instalación hidráulica para ensayar planchas redondas a flexión: 1, cilindro motor; 2, plancha ensayada; 3, tapa anillo; 4, tubería de aceite.

La inyección del aceite en el cilindro se efectúa gradualmente. Aumentando la presión en el cilindro a intervalos iguales, se toman simultáneamente las lecturas en los indicadores. Una vez descargada la plancha, se debe verificar las lecturas iniciales.

Las flechas buscadas se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$w_1 = \Delta n_{1m} c_1, \quad w_2 = \Delta n_{2m} c_2, \ \ldots,$$

donde c_1, c_2, ... son valores de una división de los indicadores (generalmente idénticos e iguales a 0,01 mm);

Δn_{1m}, Δn_{2m}, valores medios de los incrementos de lecturas en los indicadores.

El ensayo se realiza con una plancha de acero o dural de un diámetro d de 50 a 100 mm y un espesor de 1 a 3 mm, empotrada por todo el contorno.

Teóricamente, la pequeña flecha de la plancha redonda de un espesor constante con los bordes empotrados cargada con una

carga continua uniforme de una intensividad p, se expresa con la fórmula

$$w = \frac{p}{64D}(a^2 - r^2)^2, \tag{94}$$

donde r es la distancia desde el centro de la plancha hasta el punto dado, en el cual se determina la flecha:

$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$, rigidez cilíndrica de la plancha, siendo

E el módulo de elasticidad del material;

t, espesor de la plancha;

μ, relación de Poisson.

La flecha máxima se observa en el centro de la plancha, es decir, cuando $r = 0$ y, como se ve de la fórmula (94), se expresa del modo siguiente:

$$w_{máx} = \frac{pa^4}{64D}. \tag{95}$$

Las vórmulas (94) y (95) son justas cuando $w \leqslant 0{,}2\ t$.

CAPÍTULO XIII

Instalaciones de laboratorio para experimentos facultativos

§ 39. BANCO PARA EL ENSAYO DE MODELOS VOLADIZOS

El presente capítulo cubre la descripción de algunos experimentos facultativos (e instalaciones correspondientes), cuyo contenido pasa de la raya del curso corriente de Resistencia de Materiales.

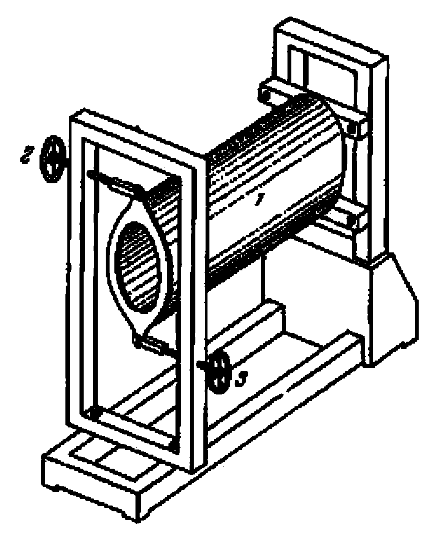


Fig. 186 | Banco para ensayos de modelos voladizos a torsión y flexión. El momento límite flector es de 10 tfm, el torsional, de 5 tfm. *1*, modelo; *2* y *3*, tornillos para cargar el modelo.

En la práctica no pocas veces surge la necesidad de investigar experimentalmente la deformación y tensión de una estructura, cuyo cálculo teórico es dificultoso o imposible. En la fig. 186 se muestra el esquema de un banco soldado móvil para ensayar modelos con momento flector de hasta 10 tfm y momento torsional de hasta 5 tfm, fabricado de vigas de acero laminado de doble te № 18.

La carga del modelo se efectúa por intermedio de un bastidor empalmado con la base del banco por pernos. El bastidor puede instalarse en cualquier lugar de la base según la longitud

del modelo. En el bastidor se sujetan los tornillos, apretando los cuales se aplican al modelo tales o cuales cargas; los tornillos pueden ubicarse en cualquier lugar del bastidor.

En el banco no sólo se realiza el esquema de sujeción del modelo en voladizo; introduciendo un apoyo complementario puede llevarse a cabo fácilmente su instalación como viga.

La medición de la carga se efectúa por medio de los dinamómetros de muelle que se sitúan entre los tornillos de carga y los puntos de aplicación de carga al modelo. Las tensiones en el modelo se miden por medio de los extensómetros de palanca o eléctricos. Las flechas durante la carga estática se miden con ayuda de los indicadores fijados en unos montantes especiales puestos sobre el suelo. Si las flechas son grandes, en vez de los indicadores se utilizan miras colgantes observadas en el anteojo del nivel. A causa de una rigidez insuficiente del empotramiento del modelo se deben medir también los desplazamientos de los puntos de su sujeción.

En el banco pueden investigarse tales problemas difícilmente resueltas como torsión y flexión de una camisa cilíndrica o cónica con ranuras. Allí mismo pueden realizarse los ensayos de camisas a deslizamiento y flexión.

§ 40 INSTALACION PARA LA INVESTIGACIÓN DE FLEXION TRIDIMENSIONAL DE UNA BARRA DE EJE CURVILÍNEO

La investigación teórica de la flexión tridimensional de una barra de eje curvilíneo presenta un problema complicado. El experimento ayuda a resolver este problema. En la fig. 187 se muestra una instalación para la investigación experimental de las deformaciones y tensiones de una barra plana de eje curvilíneo de paredes delgadas al cargarla con una fuerza perpendicular a su plano.

La viga de acero de doble de № 18 encorvada por un semicírculo se encuentra horizontalmente sobre tres apoyos. Su construcción permite realizar tanto el empotramiento como el apoyo libre de la viga. Por el alma inferior de la viga se desplaza sobre rodillos una carretilla que porta una plataforma para el peso. La carretilla puede situarse en cualquier lugar de la viga para estar cargada después; puede también desplazarse junto con el peso. En consecuencia, pueden determinarse experimentalmente no sólo las tensiones y los desplazamientos en cualquier sección de la viga, sino sus líneas de influencia. Las tensiones se miden con extensómetros; para registrar las líneas de influencia son cómodos los extensómetros eléctricos. Las flechas se miden con indicadores o miras; los ángulos de giro, con inclinómetros; los ángulos de

torsión, también con inclinómetros, pero situados perpendicularmente al eje de la viga. Para la medición de grandes ángulos de

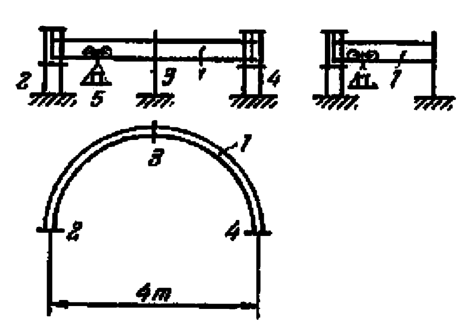


Fig. 187 | Instalación para investigar el trabajo de una barra de eje curvilíneo de paredes delgadas: *1*, barra de eje curvilíneo; *2*, *3* y *4*, apoyos; *5*, peso móvil.

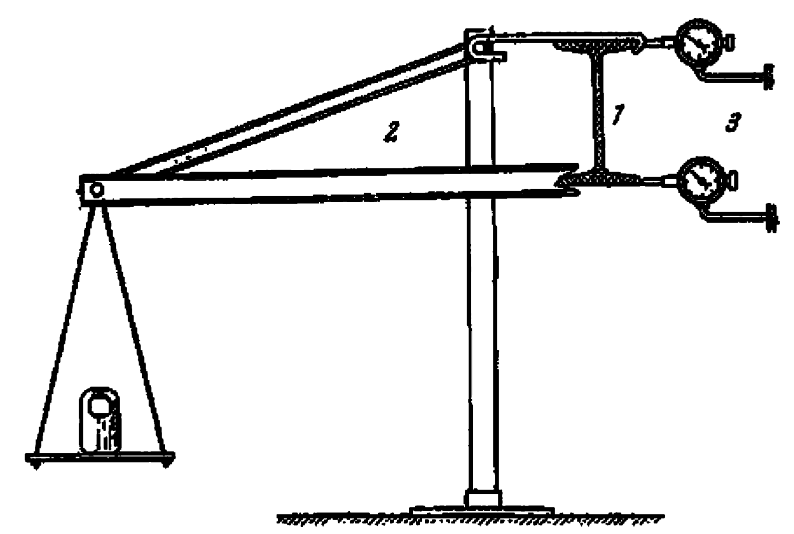


Fig. 188 | Esquema del ensayo de una barra a torsión: *1*, barra ensayada; *2*, dispositivo para crear el momento torsional (par) (véase también la fig. 189); *3*, indicadores para medir los ángulos de giro de la sección de la viga durante la torsión.

torsión es más cómodo utilizar indicadores puestos horizontalmente dos en cada sección, uno arriba y otro abajo, perpendicularmente al eje de la viga (fig. 188).

Cuando la carga es lo suficientemente grande, pero no excede, sin embargo, del límite de proporcionalidad, la deformación de la

viga puede ser bastante para observarla a simple vista. Las flechas de una viga de paredes delgadas de perfil abierto alcanzan el orden de unos cuantos centímetros y los ángulos de torsión, de diez a veinte grados.

§ 41. ILUSTRACIÓN DEL TEOREMA DE RECIPROCIDAD DE LOS TRABAJOS

La instalación descrita anteriormente se utiliza también con éxito para la comprobación del teorema de reciprocidad de los trabajos.

1. Datos generales. El teorema de reciprocidad de los trabajos reza: el trabajo de las fuerzas exteriores del primer estado elástico en los desplazamientos del segundo estado es igual al trabajo de las fuerzas del segundo estado en los desplazamientos del primero.

Si las cargas en ambos estados son unitarias o numéricamente iguales, llegamos a la tesis sobre la reciprocidad de los desplazamientos: el desplazamiento δ_{12} de cierto punto *1* de un cuerpo elástico originado por la fuerza aplicada en el punto *2* es igual al desplazamiento δ_{21} del punto *2* originado por la fuerza aplicada en el punto *1*.

En los teoremas tanto el desplazamiento como la fuerza se sobreentienden en sentido generalizado. Un par de fuerzas puede servir de carga; entonces el desplazamiento correspondiente es el ángulo de giro. Por fin, un grupo de fuerzas y momentos puede servir de carga. A las fuerzas en grupo les corresponden también los desplazamientos en grupo.

2. Caso de dos fuerzas. En los experimentos hay que partir de lo más elemental: colgar las plataformas para los pesos en dos puntos arbitrarios del eje de la viga. Cargar con carga arbitraria P_1 una plataforma y medir el desplazamiento Δ_{21} de otra por la vertical. Luego cargar esa misma segunda plataforma también con un peso arbitrario P_2 y medir el desplazamiento Δ_{12} de la primera plataforma.

Según el teorema de reciprocidad de los trabajos,

$$P_1\Delta_{12} = P_2\Delta_{21}.$$

Si las fuerzas P_1 y P_2 son iguales, entonces

$$\Delta_{12} = \Delta_{21},$$

es decir, los desplazamientos de las plataformas son iguales sin depender del punto de suspensión.

3. Caso de dos pares. En vez de fuerzas se puede aplicar pares. En las figs. 188 y 189 se muestra la construcción que per-

mite realizar el par de fuerzas. El peso Q, colocado sobre la plataforma, origina respecto al apoyo el momento $L = Qc$. Este momento se transmite sobre la viga en forma de un par de fuerzas horizontales.

Al aplicar el momento L_1 en alguna sección 1 de la viga, midamos el ángulo correspondiente Δ_{21} de giro de la sección 2 en su plano. El ángulo Δ_{21} que llamaremos ángulo de torsión, puede medirse, por ejemplo, por medio de dos indicadores, como puede verse en la fig. 188. Luego, aplicando el momento L_2 en la sección 2, midamos el ángulo Δ_{12} de torsión en la sección 1.

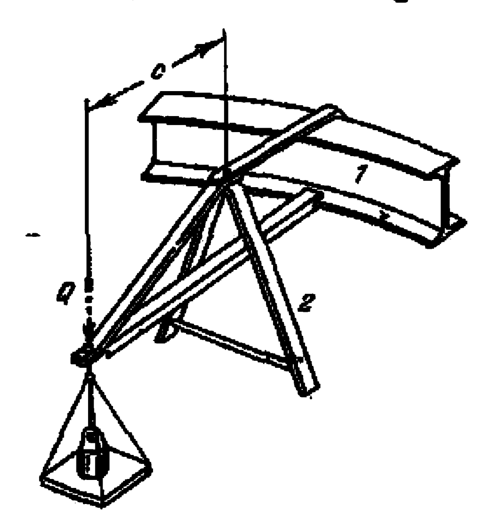


Fig. 189 Dispositivo para cargar la barra con un par de torsión (véase también la fig. 188): *1*, barra de eje curvilíneo cargada (se muestra una parte); *2*, apoyo vertical.

Según el teorema de reciprocidad de los trabajos,

$$L_1\Delta_{12} = L_2\Delta_{21}.$$

4. Caso de una fuerza y un par. Apliquemos la fuerza P_1 en la sección 1 y midamos el ángulo de torsión Δ_{21} en la sección 2. Luego apliquemos el par L_2 en la sección 2; la flecha correspondiente en la sección 1, haciendo uso de las denominaciones aceptadas, es Δ_{12}. De acuerdo con el teorema de reprocidad de los trabajos tiene que ser lo siguiente:

$$P_1\Delta_{12} = L_2\Delta_{21}.$$

Si escogemos P_1 y L_2 numéricamente iguales, por ejemplo, tomando $P_1 = 40$ kgf y $L_2 = 40$ kgm, entonces obtendremos:

$$\Delta_{12} = \Delta_{21};$$

donde la flecha Δ_{12} se expresa en metros y el ángulo Δ_{21}, en radianes.

5. Caso de varias fuerzas. Aumentando el número de fuerzas y pares, se puede investigar diferentes variantes de carga. Supongamos, por ejemplo, que en el primer estado a la viga se le aplican la fuerza P_1 y el momento L_2 en las secciones 1 y 2, respectivamente. Denominemos por Δ_{31} y Δ_{41} las flechas ocasionadas por esta carga en ciertas secciones arbitrarias 3 y 4.

En el segundo estado tomemos la carga en forma de dos fuerzas P_3 y P_4 aplicadas en las secciones 3 y 4. Denominemos por Δ_{12} la flecha correspondiente en la sección 1, y por Δ_{22} el ángulo de giro de la sección 2 en su plano. Según el teorema de reciprocidad de los trabajos es justa la siguiente igualdad:

$$P_1\Delta_{12} + L_2\Delta_{22} = P_3\Delta_{31} + P_4\Delta_{41}.$$

§ 42. INSTALACIÓN PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DEL CENTRO DE DESLIZAMIENTO

1. Datos generales. En el experimento 15 fue examinada la determinación de la posición del centro de flexión. Para un perfil de canal la abscisa del centro de flexión se determina por la fórmula (véase la fórmula 27 en la pág. 102).

$$d = \frac{b^2h^2t_1}{4J_x},$$

donde t_1 es el espesor del ala.

A veces el centro de flexión se denomina centro de rigidez. Nosotros hemos de distinguir estas dos nociones.

Examinemos un perfil de canal simétrico; en este caso ambos centros se encuentran sobre el eje de simetría del perfil. El *centro de flexión* es un punto en el plano de la sección, a través del cual pasa la resultante de las fuerzas tangenciales determinadas según la teoría elemental de la flexión de la viga. El *centro de rigidez* es un punto, a través del cual pasa la resultante de las fuerzas exteriores sin originar torsión de la viga. En el caso de una viga bastante larga el centro de flexión coincide con el de rigidez. Al disminuir la longitud de la viga, el centro de rigidez se desplaza, y en el caso de una viga corta coincide con el *centro de deslizamiento.* Este se encuentra, para un perfil de canal, en el punto de intersección del eje de simetría del perfil con el eje de la pared.

2. Realización del ensayo. La posición del centro de rigidez se determina mediante las situaciones de prueba del peso. Se emplea carga manual o con máquina, según la potencia de la viga ensayada. En el caso del ensayo con máquina (fig. 190) la viga se pone sobre dos apoyos y se carga en el medio a través de una barra auxiliar colocada verticalmente. El extremo

inferior de la barra se apoya contra un soporte en la viga y el superior, contra la placa de la prensa. Sobre la viga se monta en la dirección transversal un inclinómetro que fija la torsión de la viga, cuando ésta suceda. Desplazando la viga o la barra de carga se puede hallar la posición que corresponde a la falta de torsión, mas la situación de la barra indicará el lugar del centro de rigidez.

Investigando vigas de diferente longitud se puede notar que el

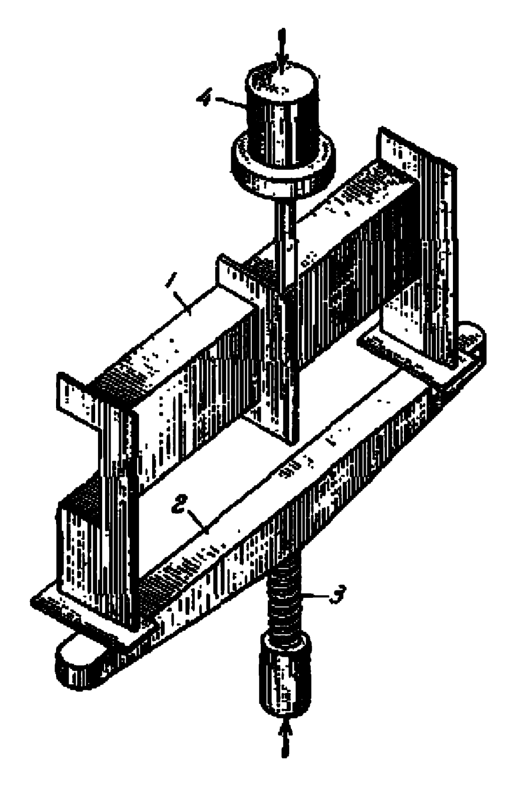


Fig. 190 | Determinación experimental de la posición del centro de rigidez de la viga durante la flexión: *1*, viga ensayada de paredes delgadas de perfil de canal; *2*, cabezal de apoyo; *3*, tornillo de la máquina que levanta el cabezal; *4*, cabeza superior de apoyo de la máquina.

centro de rigidez de la viga corta se halla más cerca de la pared que el de la larga. La desviación del centro de rigidez con respecto al de flexión se observa hasta con una longitud considerable de la viga. Cuando la relación de la longitud de la viga a la altura es igual a 10, la desviación puede ser alrededor de un 10% de la excentricidad total d. Si la relación susodicha es igual a 5, la desviación del centro de rigidez con respecto al de flexión es alrededor de un 50%, es decir, el centro de rigidez se encuentra aproximadamente en medio entre los centros de flexión y deslizamiento. Si la relación de la longitud de la viga a la altura es alrededor de 2, el centro de rigidez prácticamente coincide con el centro de deslizamiento, es decir, con la pared del canal.

El carácter de distribución de las tensiones normales por la sección de la viga se determina por medio de los extensómetros.

En el caso de viga corta la ley de distribución de las tensiones por la altura de la sección diverge de la lineal; se observa la concentración de las tensiones en los ángulos del perfil.

§ 43. INSTALACION VIBRATORIA PARA ENSAYOS A FATIGA CON VIBRADOR ELECTRODINAMICO

La instalación asegura la obtención de las frecuencias de cambio de carga 10—15 veces mayores que con las instalaciones de fatiga corrientes del tipo mecánico gracias al empleo del

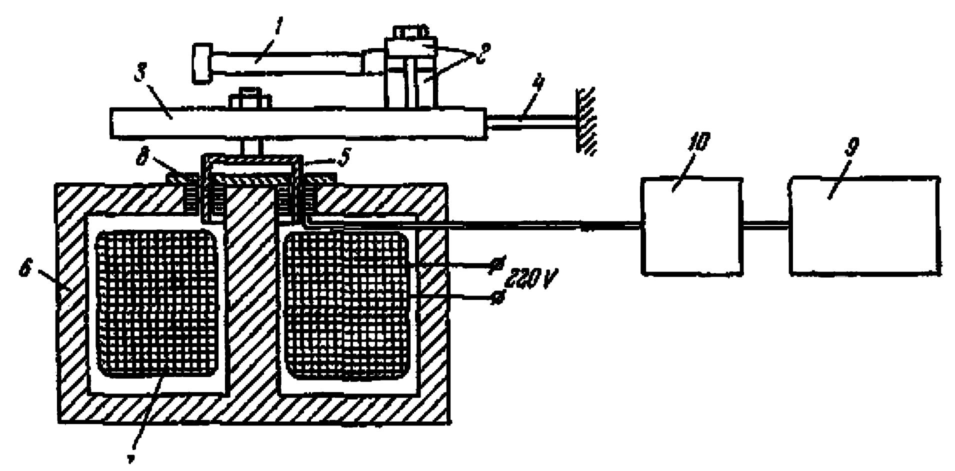


Fig. 191 | Esquema de una instalación de vibración: *1*, probeta; *2*, sujetadores; *3*, placa rígida; *4*, elemento elástico; *5*, vaso del vibrador; *6*, cuerpo; *7*, arrollamiento de corriente continua; *8*, bobinas de corriente alterna; *9*, generador de ondas acústicas; *10*, amplificador.

vibrador electrodinámico. El esquema de la instalación puede verse en la fig. 191.

La probeta ensayada *1* se fija en los sujetadores *2* sobre una placa rígida *3*. Esta se empalma, por medio del elemento elástico *4*, con el empotramiento inmóvil. Con la placa está unido rígidamente el vaso *5* del vibrador electrodinámico que tiene la siguiente construcción: dentro del cuerpo *6* que es simultáneamente el conductor magnético, se encuentra el arrollamiento *7* alimentado con corriente continua. Este engendra el campo magnético en el juego circular de aire en que se sitúa el vaso *5* y las bobinas de corriente alterna *8*. Estas se alimentan del generador de ondas acústicas *9* a través del amplificador potente *10*.

Cuando la corriente pasa por las bobinas, en el vaso se excita una corriente alterna de la misma frecuencia. La interacción de

la corriente alterna en el vaso con el campo magnético constante en el juego origina una fuerza alternativa con una frecuencia igual a la de la corriente alterna. El esfuerzo que se desarrolla depende de la intensidad de la corriente en las bobinas y la intensidad del campo magnético. Las bobinas están fijadas inmóvilmente, mientras que el vaso tiene la posibilidad de desplazamiento

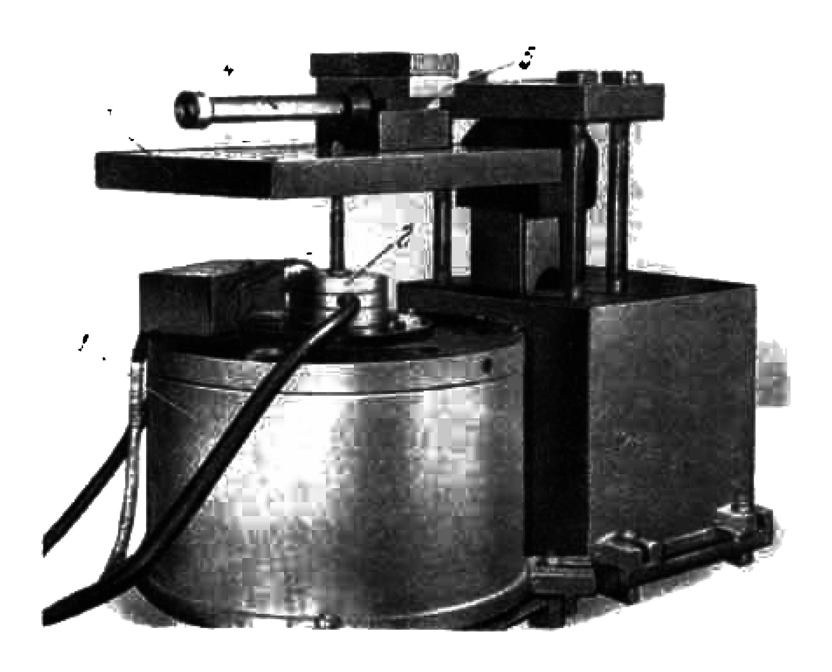


Fig. 192 | Instalación de vibración para ensayos a fatiga: *1*, vibrador; *2*, vaso; *3*, placa; *4*, probeta; *5*, sujetadores.

elástico junto con la placa. Por eso la placa, junto con la probeta sujetada encima, empieza a vibrar. Cuando la frecuencia de la corriente coincide con la frecuencia de las vibraciones propias de la probeta, su amplitud de vibraciones alcanza el máximo.

Precisamente con este régimen de resonancia se efectúa el ensayo que dura hasta la rotura de la probeta. En el proceso de desarrollo de la fisura de fatiga la frecuencia de las vibraciones propias de la probeta se varía y se tiene que cambiar respectivamente la frecuencia de la corriente. La medición y el control de las tensiones en la sección de trabajo de la probeta se realizan mediante la medición de la amplitud de las vibraciones de su extremo libre con ayuda de unos instrumentos especiales.

La instalación elaborada en el Instituto de estudio de máquinas de la Academia de Ciencias de la URSS, se muestra en la

fig. 192. La figura tiene las siguientes denominaciones: *1*, vibrador; *2*, vaso; *3*, placa; *4*, probeta; *5*, sujetadores. Las probetas ensayadas pueden tener una altura de la sección o un diámetro de hasta 40 mm. La tensión máxima nominal en la probeta es de ± 25 kgf/cm². Aplicando al extremo de la probeta a través del enlace elástico una fuerza constante, se puede crear el ciclo asimétrico de carga. La frecuencia de las vibraciones es de 200 a 600 Hz. Las bobinas de corriente alterna se alimentan del generador de ondas acústicas por intermedio del amplificador del tipo ТУ-5. Esto permite realizar los ensayos en la gama de frecuencias de 50 a 10 000 Hz.

INDICE ALFABÉTICO

A NUESTROS LECTORES:

«Mir» edita libros soviéticos traducidos al español, inglés, francés, árabe y otros idiomas extranjeros. Entré elos figuran las mejores obras de las distintas ramas de la ciencia y la técnica: manuales para los centros de enseñanza superior y escuelas tecnológicas; literatura sobre ciencias naturales y médicas. También se incluyen monografías, libros de divulgación científica y ciencia-ficción.

Dirijan sus opiniones a la Editorial «Mir», 1 Rizhcki per., 2, 129820, Moscú, 1—110, GSP, URSS.

MIROLIÚBOV I. y otros

PROBLEMAS DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Este manual de problemas ha sido preparado por un colegio de profesores de la Cátedra de resistencia de materiales del Instituto de Mecánica de Leningrado.

El propósito fundamental del libro es facilitar el estudio de una asignatura tan compleja e importante para el ingeniero, como lo es resistencia de materiales. El círculo de cuestiones que se analizan en el libro es muy amplio y abarca todos los temas que caracterizan esta disciplina. Incluye los capítulos siguientes: tracción y compresión, estados tensionales e hipótesis de resistencia, recipientes de paredes delgados, deslizamiento, cálculo de juntas, características geométricas de las secciones, torsión, flexión, resistencia compuesta, estabilidad de barras rectas, barras curvas planas, métodos energéticos de cálculo de sistemas elásticos, tubos de paredes gruesas, acción dinámica de las fuerzas y tensiones alternadas.

Para simplificar la labor del estudiante y con la finalidad de que asimile mejor la materia, en cada capítulo se exponen las bases teóricas del tema correspondiente. El manual consta de 1028 problemas. Algunos de ellos se resuelven con relativa facilidad, otros requieren ciertos hábitos, pero todos contribuirán a que el estudiante aprenda a aplicar los conocimientos teóricos adquiridos, que aprenda a resolver los problemas que plantea la práctica del ingeniero y que no siempre son de solución única y fácil.

Este libro puede servir como manual para el material teórico expuesto en el libro de P. Stiopin "Resistencia de materiales".

En lo fundamental, está destinado para los estudiantes de los centros de enseñanza técnica superior pero puede ser también de gran utilidad para los ingenieros y técnicos que se dedican a los cálculos de solidez.

